



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VÝROBA POJISTNÉHO ŠROUBU

PRODUCTION OF LOCK SCREW

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Filip Šlimar

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michaela Císařová, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Filip Šlimar**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **Ing. Michaela Císařová, Ph.D.**
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Výroba pojistného šroubu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Návrh technologie velkosériové výroby pojistného šroubu určeného k připevnění kola automobilu objemovým tvářením za studena s využitím dopředného a zpětného protlačování.

Cíle bakalářské práce:

- Rozbor současného stavu,
- srovnání možných způsobů výroby se zhodnocením jejich vhodnosti a nevhodnosti,
- provedení aktuální literární studie zvolené technologie,
- návrh výroby doložený nezbytnými technologickými a kontrolními výpočty,
- návrh sestavy a konstrukční dokumentace,
- technicko–ekonomické hodnocení.

Seznam doporučené literatury:

BABOR, Karel, Augustin CVILINEK a Jan FIALA. Objemové tváření ocelí. 1. vyd. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1967, 332 s.

BRALLA, James G. Design for manufacturability handbook [online]. second edition. New York: McGraw - Hill, 1999 [cit. 2014-03-15]. ISBN 00-700-7139-X. Dostupné z:
<http://www.scribd.com/doc/152678815/cold-headed-parts-pdf>

FELDMANN, Heinz D. Protlačování oceli. 1. vyd. Vladimír Hašek. Praha: SNTL - Státní nakladatelství technické literatury, 1962, 200 s.

DVOŘÁK, Milan, GAJDOŠ, František, NOVOTNÝ, Karel. Technologie tváření: plošné a objemové tváření. 2. vyd. Brno: CERM. 2007. 169 s. ISBN 978-80-214-3425-7.

FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. Teorie obrábění, tváření a nástroje. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-2374-9.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

ŠLIMAR Filip: Výroba pojistného šroubu.

Práce předkládá návrh technologie výroby tvářeného šroubu k upevnění kol automobilu, z materiálu 11 320.3. Byla provedena literární studie technologie tváření za studena. Byl vypočítán průměr polotovaru 15 mm. Pro výrobu bylo uvažováno několik možných způsobů výroby a z nich zvolena nejvhodnější varianta. Pro tuto variantu byly provedeny nezbytné výpočty, v rámci kterých byla vypočítána tvářecí síla 1 313 kN, která byla hlavním požadavkem při volbě postupového automatu TPZK 25. Součástí práce je výkres sestavy nástroje, průtlačníku a průtlačnice.

Klíčová slova: Ocel 11 320.3, tváření za studena, tvářecí síla, nástroj

ABSTRACT

ŠLIMAR Filip: Production of lock screw.

The project elaborated design of technology production of a screw for fastening of car wheels, made of material 11 320.3. A literary study of cold forming technology was conducted. The blank diameter of 15 mm was calculated. Several possible ways of production were considered and the most suitable option was chosen. The necessary calculations were made for this variant, in which the forming force of 1 313 kN was calculated, which was the main requirement for the selection of the TPZK 25 cold forming machine. Part of the work is a drawing of a tool assembly, ram and die.

Keywords: 11 320.2 steel, cold forming, forming force, tool

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŠLIMAR, Filip. *Výroba pojistného šroubu*. Brno, 2019. 39s, 4 výkresy, 1 příloha, CD. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117109>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Michaela Císařová.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

V dne 19.5.2019

.....

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji paní Ing. Michaele Císařové, Ph.D. za trpělivost a cenné rady týkající se zpracování bakalářské práce.

OBSAH

Zadání	
Abstrakt	
Bibliografická citace	
Čestné prohlášení	
Poděkování	
Obsah	
ÚVOD	9
1 ROZBOR ZADÁNÍ	10
1.1 Varianty výroby	10
2 OBJEMOVÉ TVÁŘENÍ ZA STUDENA	13
2.1 Základní metody	14
2.2 Technologičnost výroby	16
2.3 Vhodné polotovary	17
2.4 Přetvoření a deformační odpor	18
2.5 Tvářecí stroje	20
2.6 Nástroje	21
3 NÁVRH VÝROBY	23
3.1 Výpočet objemu	23
3.2 Varianty výroby	25
3.3 Výpočet rozměrů součástí	28
3.4 Výpočet síly a práce	30
4 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ	38
5 ZÁVĚRY	39
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	42
SEZNAM OBRÁZKŮ	44
SEZNAM TABULEK	45
SEZNAM PŘÍLOH	46
SEZNAM VÝKRESŮ	46

ÚVOD [19], [20], [21]

Automobilová doprava je v dnešní době naprosto nezbytná jak k přepravě osob tak nákladu, jedná se o jeden z největších průmyslů, který se stále rychle rozvíjí. Počátky automobilové dopravy sahají do roku 1886, kdy Karl Benz patentoval svůj první automobil, jednalo se o tříkolku poháněnou výhradně spalovacím motorem. Od vytvoření prvního automobilu vzniklo velké množství druhů. Všechny automobily obsahují karoserii, hnací soupravu a podvozek, jehož součástí jsou kola.

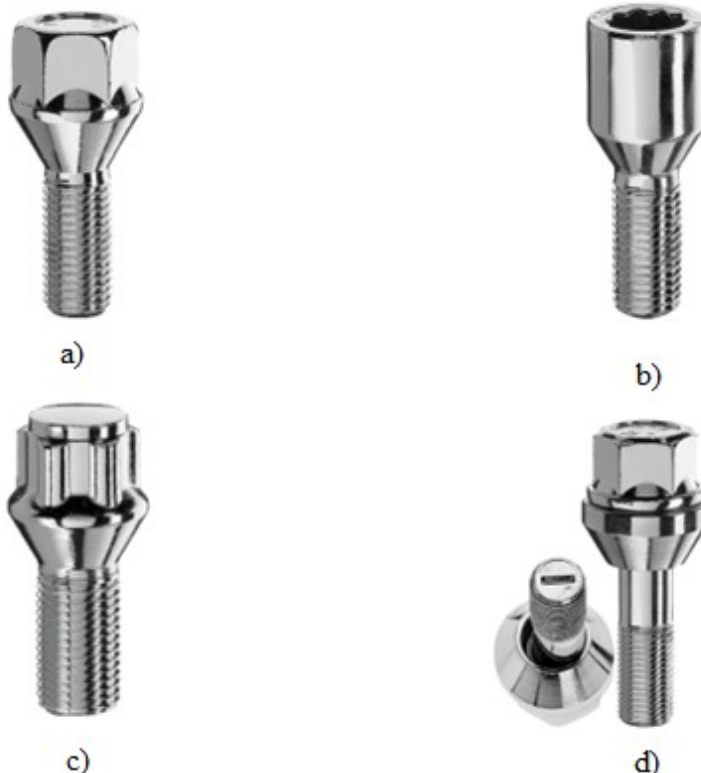
Upevnění kola automobilu je nezbytné pro jeho správnou funkci, za tímto účelem se u hliníkových a ocelových kol používají speciální šrouby nebo matice. Existuje široký sortiment lišící se podle typu vozu a výrobce. Základní rozdělení:

- klasické (obr. 2 a)
- hvězdicové (obr. 2 b)
- bezpečnostní (obr. 2 c)
- pro změnu rozteče (obr. 2 d)

Rozdělení platí jak pro šrouby tak i matice. K upevnění kol se používají klasické nebo hvězdicové a vždy jeden bezpečnostní na kolo, chrání kolo proti odcizení.



Obr. 1 Kolo automobilu [19]



Obr. 2 Rozdělení šroubů k upevnění k automobilu [20]

1 ROZBOR ZADÁNÍ [12], [16], [17], [18]

Cílem mé bakalářské práce je vytvořit návrh výroby zadané součásti, zhodnotit možné způsoby výroby a vybrat nejvhodnější metodu, pro zhotovení dané součásti. V teoretické části práce bude provedena literární studie zvolené metody výroby. V druhé části práce bude sestaven samotný návrh výroby a potřebné výpočty. V této části práce bude také navržen nástroj a zvolen vhodný stroj, včetně technické dokumentace nástroje. Na závěr bude výsledný postup zhodnocen.

Zadaná součást je šroub sloužící kupevnění kol automobilu (viz obr. 3). Největší průměr je 20,6 mm a délka součásti je 55 mm. Zbylé rozměry jsou na výkrese 1. Součást lze rozdělit na 2 hlavní části a to hlavu a dřík. Hlava je šestihranná s nákrůžkem a má velikost 17 mm. Dřík je dlouhý 30 mm a má závit M12 se stoupáním 1,5 mm po celé délce dříku. Na součást nejsou kladeny zvýšené nároky na přesnost výroby. Byla zadána série 200 000 kusů, jde tedy o hromadnou výrobu. Bude tedy kladena větší důležitost výrobnímu času a ceně, než prvotním nákladům.

Jako materiál byla zvolena ocel 11 320.3. Jedná se o nelegovanou uhlíkovou ocel, která je vhodná pro tváření za tepla i za studena, k mírnému nebo hlubokému tažení. Tento materiál se používá například k výrobě profilů. Je také dobře svařitelný. Pro lepší tvářecí vlastnosti, snížení pevnosti a zvýšení tvárnosti, byla ocel žihána. Chemické složení je v tabulce 1 a některé mechanické vlastnosti v tabulce 2.

Tab. 1 Chemické složení oceli

C [%]	P [%]	S [%]
max 0.11	max 0.045	max 0.045

Tab. 2 Vybrané mechanické vlastnosti oceli

R _m [MPa]	A [%]	R _e [MPa]	Z [%]
280	22	180	78



Obr. 3 Šroub na kola automobilu [18]

1.1 Varianty výroby [2],[6],[5],[1],[4], [8],[9], [10], [14], [15]

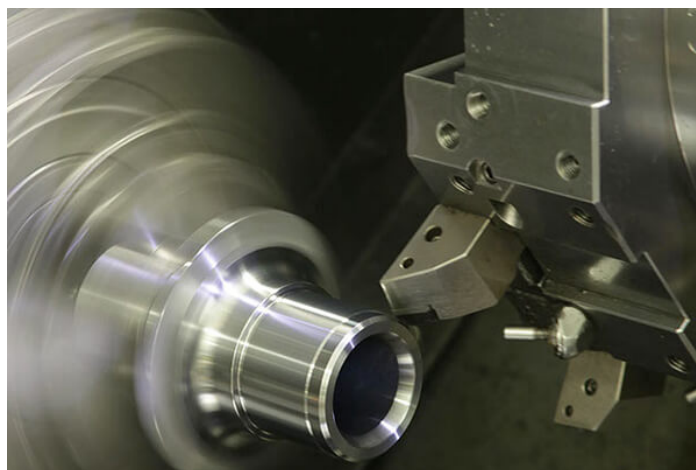
Pro zhotovení zadaného šroubu přichází v úvahu dva základní způsoby výroby a to obrábění a objemové tváření. V případě tváření je nutné rozlišovat několik způsobů a to za studena a za zvýšené teploty, sem patří kování. Při volbě způsobu výroby je nejdůležitějším kritériem možnost vyrobení součásti v požadovaném tvaru a přesnosti. Z důvodu velké série hraje nepostradatelnou roli rychlost výroby a cena za kus. Významným faktorem jsou také výsledné mechanické vlastnosti. Pro zhotovení zadané součásti přichází v úvahu tyto výrobní postupy:

- Kování (obr. 4) probíhá za tepla a je prováděno údery nebo klidně působící silou. Na výsledné náklady má vliv energie potřebná k ohřátí součásti, díky zvýšené teplotě se sníží potřebná síla. Během tvářecího procesu dochází k příznivému vlivu na mechanické a fyzikální vlastnosti. Kování také dosahuje vysokého využití materiálu. Rozlišuje se více druhů kování a to zápusťkové a volné. Pro výrobu šroubu je vhodnější kování v zápusťce, ale i touto metodou se nedosahuje požadovaných přesností a muselo by dojít k opracování pomocí jiné metody například obrábění.



Obr. 4 Kování [15]

- Obrábění (obr. 5) je metoda, kdy se požadovaného tvaru, rozměrů a jakosti povrchu dosahuje odebráním přebytečného materiálu ve formě třísek. V případě šroubu je nutné odebrat velké množství materiálu a to znamená dlouhý strojní čas a prodražení výroby. Řezným procesem dochází k narušení vláken materiálu a k negativnímu vlivu na výsledné vlastnosti. Tvarová a rozměrová přesnost jsou velice dobré a splňují požadavky na výrobu šroubu.



Obr. 5 Obrábění [14]

- Objemové tváření za studena k docílení požadovaného tvaru a rozměrů se dosahuje kombinací pěchování a protlačování. Součásti vyrobené touto metodou mají dobrou rozměrovou a tvarovou přesnost. Z ekonomického hlediska se jedná o velice produktivní metodu s vysokým využitím materiálu. Tvářecí proces má pozitivní vliv na výsledné mechanické a fyzikální vlastnosti dílu. Nedochází k přerušení vláken u součásti. Nevýhodou této metody jsou prvotní náklady na formu, ale při výrobě velkého množství dílů, je vliv na výslednou cenu zanedbatelný. Problematikou částí šroubu je závit, který se musí vytvářet jinou metodou a to obráběním nebo válcováním.

Z uvažovaných variant se, jako nejvhodnější jeví varianta objemového tváření za studena, při které lze dosáhnout dostatečné rozměrové a tvarové přesnosti bez dalších operací. Z ekonomického hlediska je nejvýhodnější, především kvůli vysokému využití materiálu a dobré rychlosti výroby. Při srovnání s obráběním je nejdůležitější parametr velikost série, z důvodu větší prvotní investice do tvářecího nástroje. Zadaná velikost série odpovídá hromadné výrobě a proto je cena formy zanedbatelná oproti ostatním nákladům. V případě menší série by bylo vhodné srovnat výnosnost obou technologií. Oproti kování není potřeba ohřívat součást a nenastávají problémy s tím spojené. Ukázky součástí vyrobitelných objemovým tvářením za studena jsou na obrázku 6.

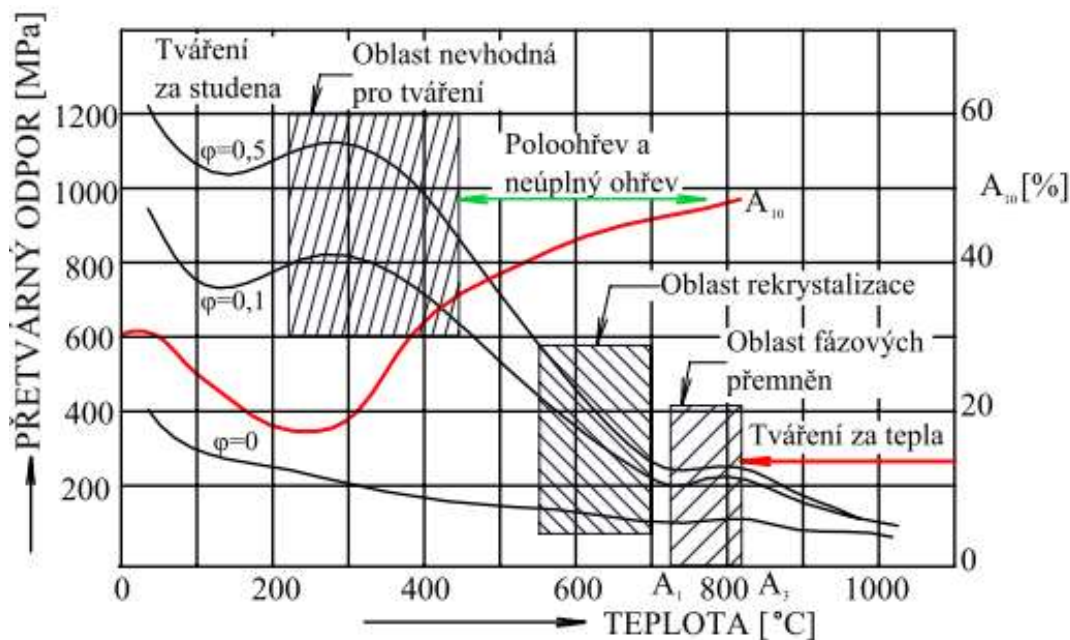
V současné době je nejčastějším způsobem výroby šroubů v hromadné výrobě tváření za studena. Používají se víceoperační tvářecí automaty. S výhodou se využívá možnosti spojit několik tvářecích operací do jednoho pracovního cyklu, to znamená více operací na jeden zdvih stroje. Díl je mezi jednotlivými nástroji automaticky přenášen, pomocí speciálního zařízení. Výchozím polotovarem je drát, který je na stroji rovnán a následně stříhán na požadovaný rozměr.



Obr. 6 Součásti vyráběné objemovým tvářením

2 OBJEMOVÉ TVÁŘENÍ ZA STUDENA [1],[2],[4],[5]

Probíhá pod rekrytalizační teplotou $T < 0,3T_{\text{tav}}$ jak lze vidět na obr. 7. Působící silou průtlačníku a průtlačnice dochází k prostorové napjatosti, která umožňuje velkému přetvoření polotovaru bez porušení soudržnosti tvářeného materiálu. Během tváření dochází ke zpevnění, a protože teplota je nižší než teplota uzdravovacích procesů musí se odpevnění dosahovat tepelnou úpravou. Tato technologie se využívá především pro výrobu rotačně symetrických dílů, většinou kombinací základních metod objemového tváření.



Obr. 7 Rozdělení tvářecích procesů podle teploty [5]

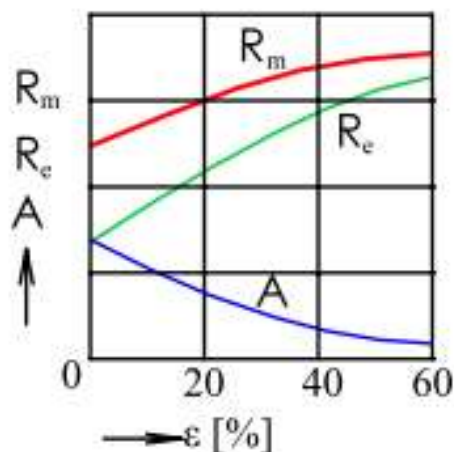
Na obrázku 8 je znázorněna změna v mechanických vlastnostech oceli. S rostoucím stupněm deformace se zvyšuje pevnost a tvrdost na úkor houževnatosti. Je jasně patrný větší nárůst meze v tahu než pevnosti v tahu. Také si lze všimnout, že s větším stupněm deformace jsou tyto změny menší. U jednotlivých ocelí se tyto změny liší především z důvodu rozdílných krystalových mřížek.

V některých případech je nutné zpevnění odstranit a to z těchto důvodů:

- hrozí vyčerpání plasticity v další tvářecí operaci, z toho důvodu se provádí mezioperační žíhání
- k obnovení nebo dosažení požadovaných fyzikálních vlastností.

Statické odpevnění má tyto fáze:

1. zotavení
2. rekrytalizace
3. sekundární růst zrn

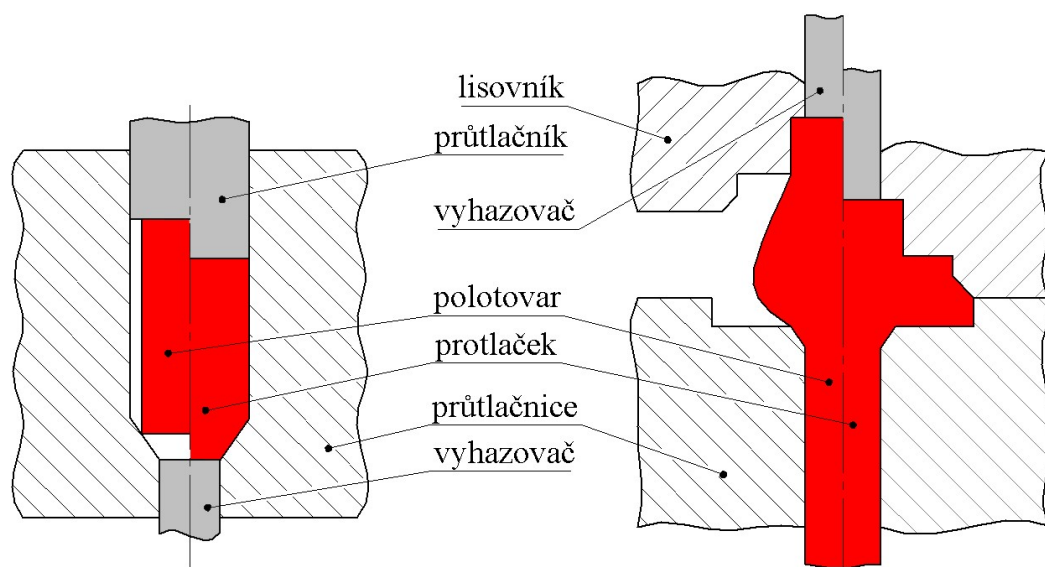


Obr. 8 Závislost mechanických vlastností na stupni deformace

2.1 Základní metody [1],[2],[4],[5],[7]

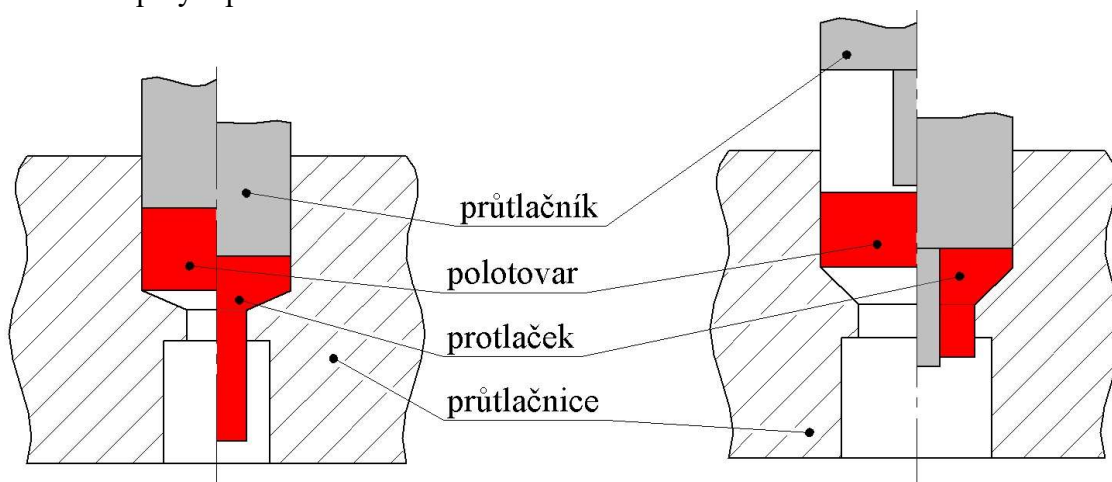
Podle směru a způsobu tečení materiálu se objemové tváření za studena dělí na dvě základní metody a to pýchování a protlačování. Složitějších tvarů se dosahuje jejich kombinací. Protlačování lze dále dělit na další podkategorie.

- Pýchování (obr. 9) - operace, při které dochází ke stlačení polotovaru mezi dvěma protilehlými plochami. Objem zůstává konstantní a dochází ke zvětšení průřezu a zmenšení výšky. Za reálných podmínek změna není ideální vlivem tření a vzniká soudečkovitost. Tato operace se používá pro výrobu součástí čepového tvaru, nebo jako dílčí operace například ke kalibraci za účelem dosažení přesných rozměrů a zarovnání čel polotovarů deformovaných po dělení materiálu.



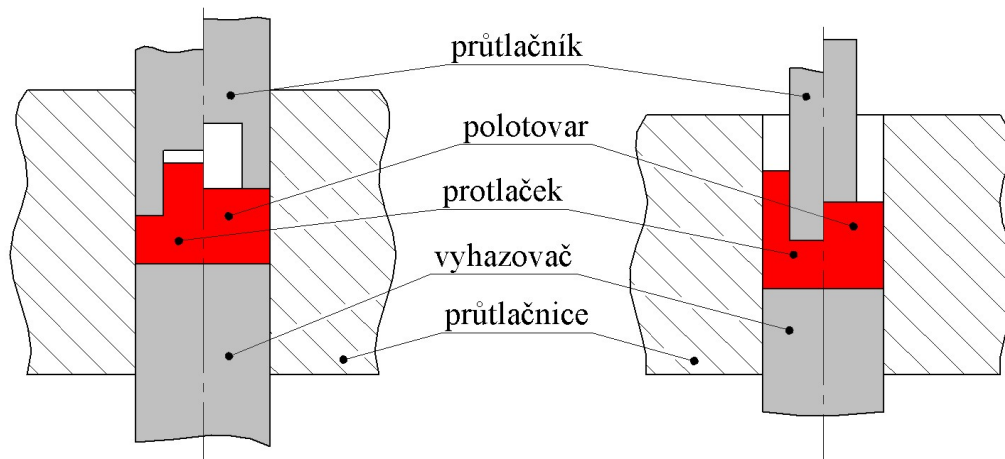
Obr. 9 Schéma pýchování

- Dopředné protlačování (obr. 10) - proces, při kterém materiál teče ve směru pohybu průtláčníku. Délka výlisku zpravidla nezávisí na délce průtláčnice. Výchozím polotovarem může být například špalík, kalíšek, anebo prstenec. Poměr délky polotovaru k jeho šířce může být až 24:1. Používá se pro převážně symetrické součásti, mohou být duté nebo s plným profilem.



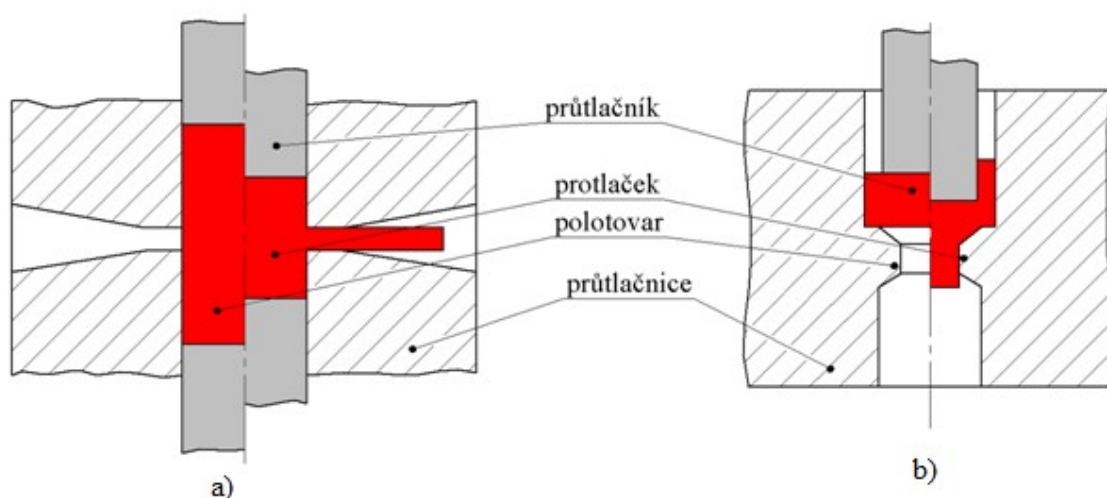
Obr. 10 Schéma dopředného protlačování

- Zpětného protlačování (obr. 11) - materiál teče proti směru pohybu průtlačníku. Kvůli velkému přetvárnému odporu je tato metoda výhodná jen u nízkých tlustostěnných protlačků. Maximální poměr délky polotovaru k průměru je 3:1.



Obr. 11 Schéma zpětného protlačování

- Stranové protlačování (obr. 12 a) - materiál teče kolmo na směr pohybu průtlačníku a umožňuje změnu průřezu určité části protlačku, nebo při vytváření pravidelných nebo nepravidelných výstupků na stranách.
- Kombinované protlačování (obr. 12 b) - jedná se o kombinaci dopředného a zpětného protlačování. Materiál tedy teče jak ve směru pohybu průtlačníku tak protisměru. Aby materiál zatekl jak do horní tak do spodní části, je důležité, aby ve spodní části byl menší stupeň deformace (redukce).
- Hydrostatické – metoda využívá kapalinu k přenosu tvářecí síly. Polotovár je obklopen kapalinou o vysokém tlaku, která způsobuje všestranné napětí, tímto způsobem je možné dosáhnout vyšší tvárnosti materiálu. Kapalina také snižuje tření mezi polotovarem a zápusťou a přímo v oblasti protlačování. Tato technologie je vhodná pro tváření křehkých materiálů.



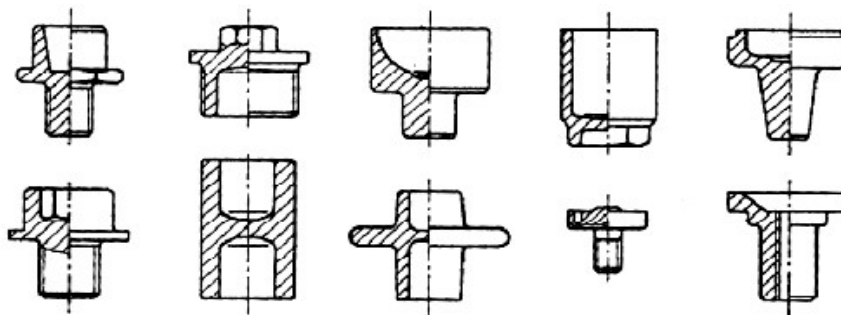
Obr. 12 Schéma protlačování a) stranové, b) sdružené

Pro výrobu zadaného šroubu jsou metody stranového a kombinovaného protlačování nevhodné. Hydrostatické protlačování, kvůli vysokým nárokům na stroj a nástroj, by prodražovalo výrobu. Z uvedených způsobů je pro výrobu šroubu dostačující pýchování, dopředné a zpětné protlačování.

2.2 Technologičnost výroby [2],[3],[4]

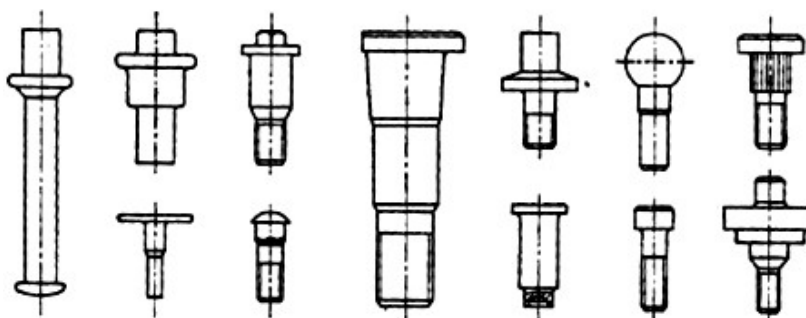
Objemovým tvářením lze vyrábět rozmanité množství součástí, mohou být symetrické, nesymetrické, duté, s plným profilem, nebo s průchozí dírou. Podle tvaru se dají rozdělit do následujících 4 skupin:

- a) Součásti kalíškového tvaru mohou být jednostranné i dvoustranné (oboustrané), nejčastěji jsou vyráběné dopředným a zpětným protlačováním.



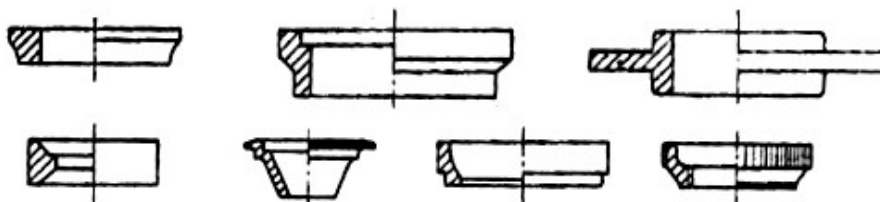
Obr. 13 Součásti kalíškového tvaru [2]

- b) Součásti čepového tvaru se zhotovují pýchováním, stranovým a dopředným protlačováním.



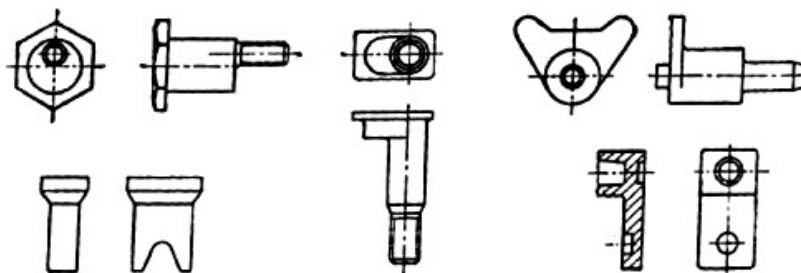
Obr. 14 Součásti čepového tvaru [2]

- c) Nízke rotační součásti s průchozím otvorem vyrábějí se kombinací základních metod objemového tváření.



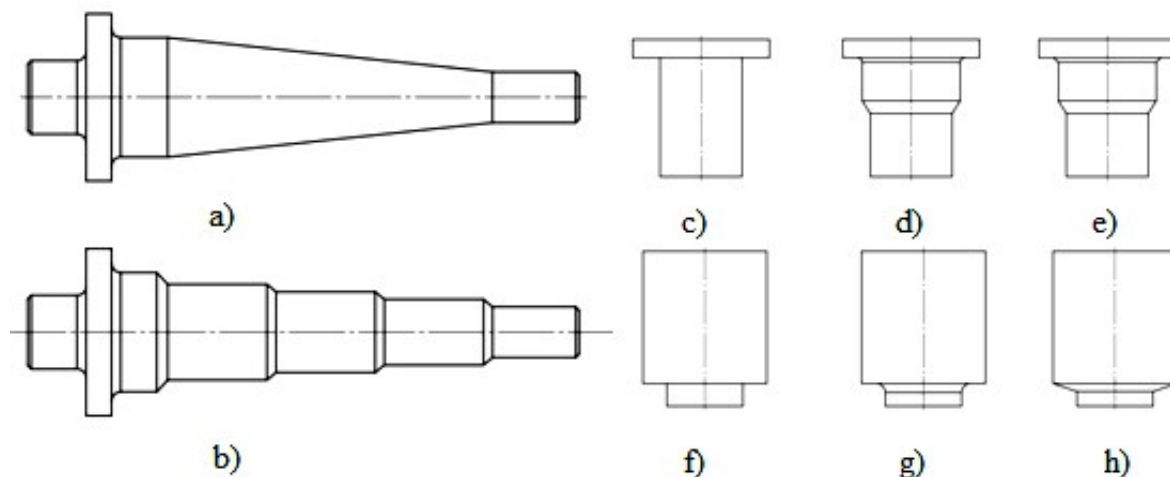
Obr. 15 Nízke rotační součásti s průchozím otvorem [2]

- d) Součásti nepravidelného tvaru se zhotovují jen poměrně složité a jejich výroba není rozšířená.



Obr. 16 Součásti nepravidelného tvaru [2]

Při návrhu součásti jsou zde jistá pravidla, která by se měly dodržovat, aby byla součást vyrobitelná a nedošlo ke zbytečnému prodražení výroby. Nemělo by docházet k náhlým změnám příčných průřezů (obr. 17 c, f), ostrým hranám a rohům, lze je nahradit zkosením nebo zaoblením, vhodně upravené díly jsou na (obr. 17 d, e, g, h). Problematické jsou také dlouhé kuželové plochy (obr. 17 a), jak vnitřní tak vnější, zpravidla se nahrazují odstupňováním (obr. 17 b). Výhodné jsou osově symetrické díly, u kterých není potřeba zajištění proti otočení. Hloubka vtačovaného otvoru by neměla být větší než dvojnásobek průměru, aby nedošlo k poškození průtlačníku.



Obr. 17 Příklady vhodného a nevhodného tvaru výlisků

2.3 Vhodné polotovary [3], [4]

Kromě dodržení jistých konstrukčních zásad je nutné také zvolit vhodný materiál, jeho tepelné zpracování a počítat se změnou jeho vlastností v průběhu tváření. Nejčastěji se používají nízko legované až středně legované oceli s nízkým obsahem uhlíku.

Mezi požadované vlastnosti oceli patří nízká mez kluzu, vysoká tažnost, velká kontrakce, která by měla být alespoň 50 až 60%. Struktura oceli by nejlépe měla být perliticko-feritická se zcela globulárním perlitem. Vhodné struktury lze dosáhnout také žiháním. U složitějších protlačků se používá ocel uklidněná hliníkem. Oceli mohou být rozděleny do následujících tří skupin podle obtížnosti tváření:

- Do skupiny zvláště vhodných materiálů – patří sem například oceli třídy 11 300, 11 320, 11 330, 11 343, 11 373, 12 010, 12 011 a 12 013
- Pro dobře tvářitelné materiály – je vhodné tepelné zpracování a povrchová úprava, sem můžeme zařadit např. 11 350, 11 375, 11 423, 11 425, 11 523, 12 020, 12 030, 14 120 a 14 220.
- U obtížně tvářitelných materiálů je důležité tepelné zpracování, povrchová úprava, mazání a rozdělení celého procesu na více operací. Dochází k velkému namáhání nástroje. Sem patří oceli třídy 11 500, 11 600, 16 220, 16 221, 17 021, 17 027, 17 115 a 17 255.

Polotovary by měl být tvarově a rozměrově co nejpodobnější tvářenému dílu, ale musí být zároveň normalizovaný a dostupný. Jakékoliv speciální požadavky způsobují zbytečné prodražení výroby. Při volbě polotovaru se také vychází ze zákona zachování objemu, to znamená, že polotovary musí mít stejný objem jako díl vzniklý tváření. Používané tvary polotovarů patří:

- Plné špalíky – mohou být kruhového nebo jiného průřezu, jejich délka je větší než polovina vnějšího rozměru. Získávají se z drátů nebo tyčí, které jsou narovnány a poté děleny na požadovaný rozměr stříháním nebo řezáním.
- Kaloty – často kruhového nebo čtvercového průřezu, ale může být i jiný. Výška polotovaru je menší než polovina vnějšího rozměru. Jsou vyráběny z plechů nebo pásů vystřihováním.
- Špalíky s průchozím otvorem – Získávají se ze silnostěnných bezešvých trubek, řezáním, stříháním nebo upichováním.
- Prstence – získávají se z tažených drátů různých průřezů stříháním, svinutím, svařením

2.4 Přetvoření a deformační odpor [1], [2],[11]

Pro zvolení vhodného technologického postupu, tvářecí síly a porovnání různých metod je důležité znát hodnoty přetvoření a deformačního odporu pro jednotlivé operace a části výlisku. Přetvoření udává poměrnou plastickou deformaci a dělí se na poměrné a logaritmické. Znat jeho velikost je důležité pro další výpočty a porovnání deformací v součásti. Používá se přetvoření logaritmické, které jde v případě více operací sčítat.

Výpočet poměrného přetvoření:

$$\varepsilon = \frac{h_p - h_k}{h_p} \quad [-] \quad (2.1)$$

kde: h_p – počáteční výška [mm]

h_k – konečná výška [mm]

Výpočet logaritmického přetvoření pro pěchování:

$$\varphi = \ln \frac{D_k^2}{D_p^2} \quad [-] \quad (2.2)$$

kde: D_k – konečný průměr [mm]

D_p – počáteční průměr [mm]

Výpočet logaritmického přetvoření pro protlačování plného profilu:

$$\varphi = \ln \frac{D_p^2}{D_k^2} \quad [-] \quad (2.3)$$

Výpočet logaritmického přetvoření pro protlačování dutého profilu:

$$\varphi = \ln \frac{D_p^2 - d_v^2}{D_k^2 - d_v^2} \quad [-] \quad (2.4)$$

kde: d_v – vnitřní průměr výtažku [mm]

Přirozený přetvárný odpor je napětí vznikající uvnitř tělesa jako reakce na tvářecí sílu za podmínek jednoosého stavu napjatosti. Toto vnitřní napětí musí být dostatečně velké, aby došlo k plastické deformaci. Hodnotu pro jednotlivé materiály je možné vyčíst z diagramů zpevnění nebo vypočítat, k tomu je zapotřebí znát logaritmické přetvoření.

Pokud je přirozený přetvárný odpor rozšíříme o vliv pasivních odporů, získáme deformační odpor. Při konkrétních podmínkách má i deformační odpor konkrétní hodnotu. Vliv na tuto hodnotu má například teplota deformace, rychlost deformace, stav napjatosti, stupeň

deformace, vliv vnějšího tření, chemické složení a fyzikální stav kovu. Výpočty se liší pro pēchování, dopředné a zpětné protlačování.

Výpočet deformačního odporu pro pēchování podle Siebela:

$$\sigma_d = \sigma_{ps} \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{f \cdot D_k}{h_k}\right) \quad [\text{MPa}] \quad (2.5)$$

kde: σ_{ps} – přirozený přetvárný odpor [MPa]

f – součinitel tření [-]

Výpočet deformačního odporu pro dopředné protlačování plného profilu podle Feldmanna:

$$\sigma_d = \sigma_{ps} \cdot \left[\left(1 + \frac{f_2}{\alpha}\right) \cdot \ln\left(\frac{d_p}{d_k}\right)^2 + \frac{2}{3} \cdot \alpha \right] + 4 \cdot f_2 \cdot \frac{d_k \cdot l_k}{d_p^2} \cdot \sigma_{ps} + 4 \cdot f_1 \cdot \frac{l_p}{d_p} \cdot \sigma_{p1} \quad [\text{MPa}] \quad (2.6)$$

kde: f_1 – součinitel smykového tření zásobníku [-]

f_2 – součinitel smykového tření průtlačnice [-]

f_3 – součinitel smykového tření kalibračního oka [-]

α – úhel kuželu průtlačnice [rad]

σ_{p1} – přetvárný odpor materiálu v předchozí operaci [MPa]

l_p – výška neprotlačeného tělesa [mm]

l_k – výška kalibračního oka [mm]

Výpočet deformačního odporu pro zpětné protlačování dutých těles podle Siebela:

$$\sigma_d = 1,152 \cdot \sigma_{p1} \cdot \frac{d_{vn}^2}{d_v^2} \cdot \left(\log \frac{d_{vn}^2}{d_{vn}^2 - d_v^2} + \frac{d_{vn}^2}{d_{vn}^2 - d_v^2} \cdot \log \frac{d_{vn}^2}{d_v^2} + \log \frac{d_v^2}{d_{vn}^2 - d_v^2} \right) \quad [\text{MPa}] \quad (2.7)$$

kde: d_{vn} – vnější průměr protlačku [mm]

d_v – vnitřní průměr protlačku [mm]

Pro použití vzorce pro zpětné protlačování podle Siebela je stanovena podmínka:

$$s > 0,1 \cdot d_1 \quad (2.8)$$

kde: s – tloušťka stěny [mm]

Zjištění velikosti deformačního odporu je nutné pro následný výpočet protlačovací síly a práce, které jsou základními parametry při volbě tvářecího stroje.

Obsah vztah pro výpočet síly:

$$F = \sigma_d \cdot S \quad [\text{N}] \quad (2.9)$$

kde: σ_d – deformační odpor [MPa]

S – obsah pēchované plochy [mm²]

Obsah vztah pro výpočet práce:

$$A = F \cdot \Delta h \quad [\text{J}] \quad (2.10)$$

kde: F – tvářecí síla [N]

Δh – rozdíl počáteční a konečné výšky [m]

2.5 Tvářecí stroje [2], [3], [13]

Pro samotnou realizaci výroby je nezbytný vhodně zvolený stroj, který realizuje samotnou výrobu, hlavními parametry jsou síla, práce a tuhost. Používají se postupové tvářecí automaty nebo lis, které lze rozdělit na hydraulické a mechanické.

- Hydraulické – Pohyb beranu je zajištěn hydraulickým převodem tlakové energie pracovní kapaliny z čerpadla nebo akumulátoru. Tyto lis jsou vhodné především pro dlouhé výlisky, protože dovedou působit velkou tvářecí silou na dlouhou vzdálenost. Výhodné je také působení tvářecí síly téměř po celý zdvih a malé dosedací síly, které zvyšují životnost nástroje. Oproti tomu nevýhodou je menší počet zdvihů a malá pracovní rychlost.
- Mechanické (obr. 18) – Výhodou těchto lisů je především jejich velká tuhost, která zajišťuje přesnost výlisků a dobrou životnost nástroje. Další důležitý parametr je velká tvářecí síla, proto jsou vhodné především pro větší součásti v menších sériích. U tohoto typu lisů se rozlišuje více typů podle převodového systému a to výstředníkové, kolenové a klikové.
- Postupové automaty (obr. 19) – Jedná se o nejpoužívanější stroje pro hromadnou výrobu. Umožňují odštíření polotovaru ze svitku a tváření v jednotlivých operacích současně. Využívají mechanické lis a polotovary se posouvají pomocí speciální kleštiny.



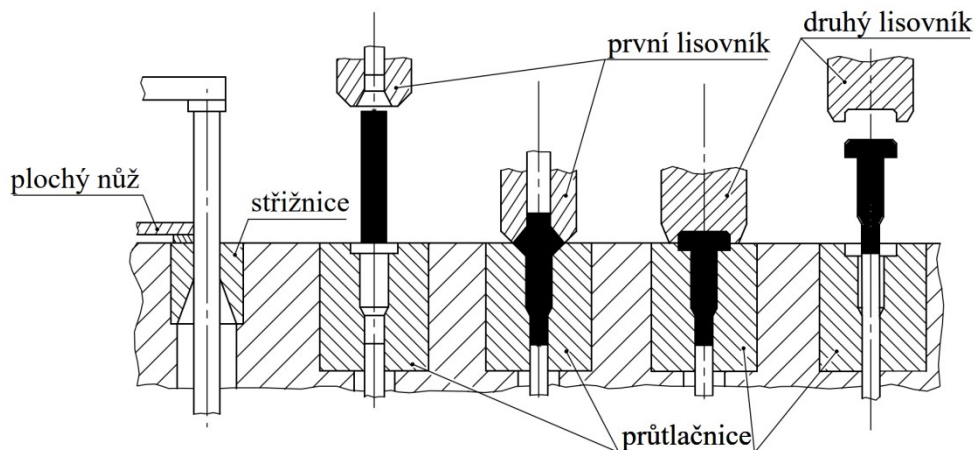
Obr. 18 Klikový lis [24]



Obr. 19 Postupový automat [25]

2.6 Nástroje [1], [2], [3], [22]

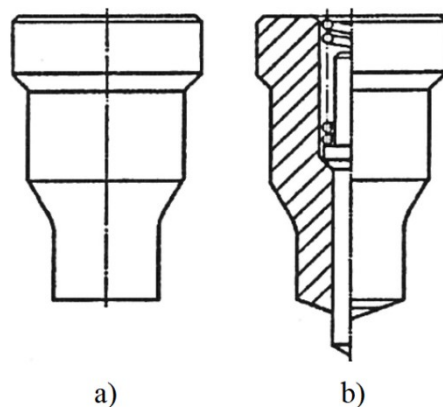
Na výrobní proces mají velký vliv nástroje, jejich volba závisí především na použitém stroji, na obrázku 20 lze vidět schéma dvoufázového pēchovacího automatu. Tvāření za studena se používā pro vārobu větších sérií, kvůli vyšší investici do nástrojů. Požaduje se od nich nízké pořizovací náklady, dlouhá životnost, tuhé a přesné provedení. Nejdůležitější jsou funkční části nástroje, které se liší podle druhu operace.



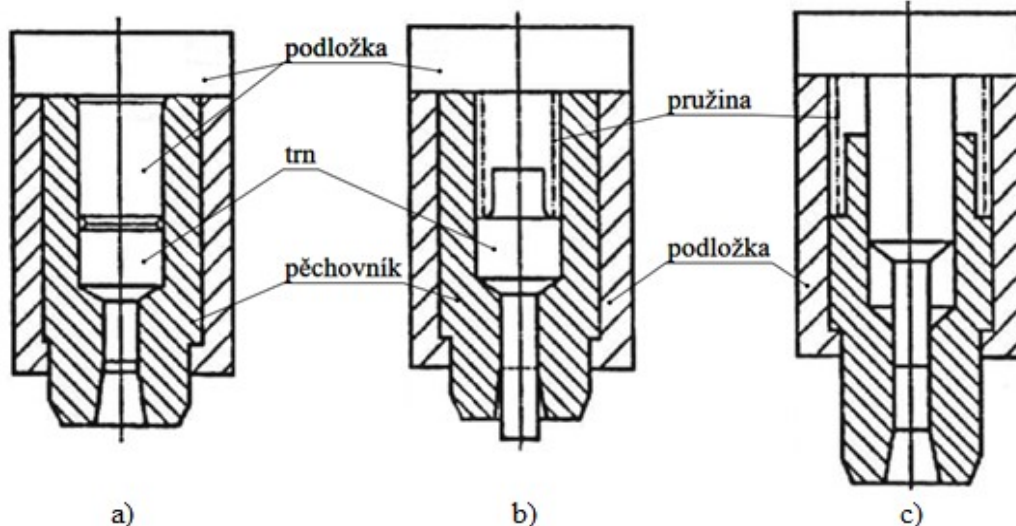
Obr. 20 Schéma nástroje pro dvoufázový pēchovací automat

Pēchovací nástroje mohou být určeny k předpēchování před další operací nebo k napēchování do požadovaného tvaru. Dutina funkční části nástroje je negativem tvārené součásti. Pro předpēchování se používají pēchovníky s rovným čelem (obr. 21 a), nebo se zahloubením (obr. 21 b).

Podle konstrukčního lze rozdělit pēchovníky do tří skupin obvyklé provedení, které je jednoduché a snadno zhotovitelné (obr. 22 a), s odpruženým trnem, vhodné pro součásti s krátkým trnem (obr. 22 b) a s odpruženým pēchovníkem, které se používā pro dlouhé dřívky (obr. 22 c).

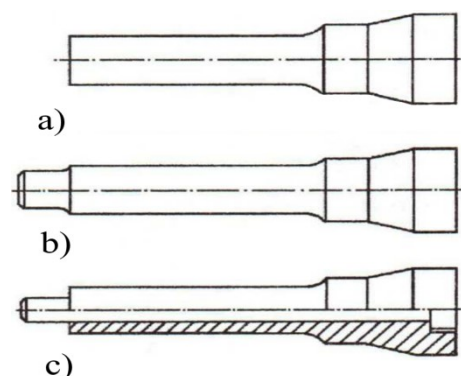


Obr. 21 Používané tvary pēchovníků [2]

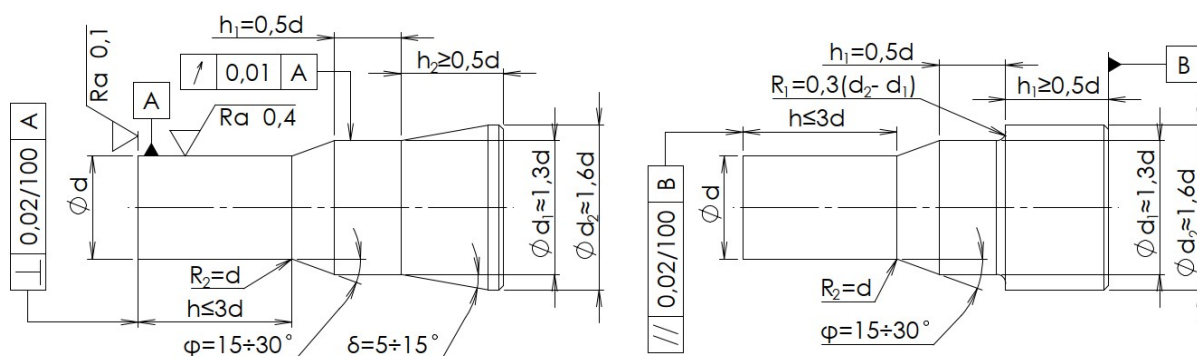


Obr. 22 Konstrukční provedení pēchovníků [1]

Během dopředného protlačování jsou nejdůležitější a nejvíce namáhané části průtlačník a průtlačnice. Průtlačník se skládá z hlavy a dříku, mezi kterými se volí pozvolný přechod, aby nedocházelo ke koncentraci napětí. Upínací část může být kuželová nebo válcová. Pro tváření plného profilu by průtlačník měl být z jednoho kusu (obr. 23 a), v případě dutého tělesa je výhodné využít dělený průtlačník (obr. 23 c). Na obrázku 24 jsou doporučené rozměry, pro protlačování plných profilů.



Obr. 23 Provedení průtlačníku [1]

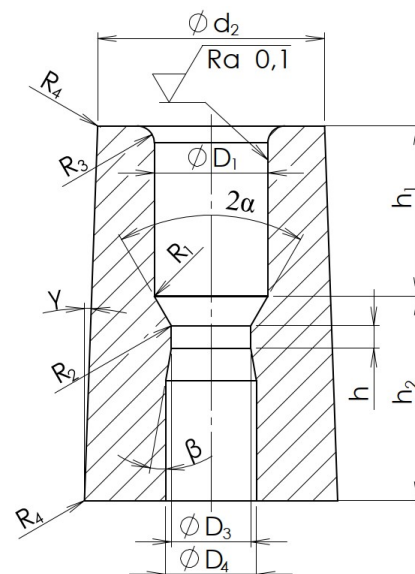


Obr. 24 Doporučené rozměry pro průtlačník [1]

Průtlačnice se zpravidla zapouštějí do objímky, pro zvýšení únosnosti a snadnější výměnu. Využívají se dva způsoby zapouzdření, a to s přesahem na kuželovou plochu, nebo s ohřevem objímky na válcovou plochu. Průtlačnice by měla mít zaváděcí rádius a vhodně zvolený redukční kužel, který významně ovlivňuje deformační odpor. Doporučené rozměry jsou na obrázku 25 a tabulce 3.

Tab. 3 Doporučené parametry průtlačnice

Teplota tváření [°C]	20°C
D_4 [mm]	$D_3 + (0,1 \div 0,2)$
h [mm]	$0,5 \cdot \sqrt{D_3}$
2α [°]	$30^\circ \div 90^\circ$
R_1 [mm]	$(D_1 - D_3)/2$
R_2 [mm]	$(0,05 \div 0,1) \cdot D_3$
R_3 [mm]	asi $0,15 \cdot D_1$
h_2 [mm]	min $0,7 \cdot D_1$
γ [°]	$1^\circ \div 3^\circ$
β [°]	$5^\circ \div 10^\circ$



Obr. 25 Průtlačnice pro dopředné protlačování [1]

3 NÁVRH VÝROBY

Pro zhotovení zadané součásti metodou objemového tváření za studena je nutné zvolit nejvhodnější metodu výroby a polotvar. Volba byla doplněna o potřebné kalkulace. Dále byly provedeny nezbytné výpočty pro jednotlivé operace, mezi nimi i výpočet tvářecí síly a práce, nezbytný pro volbu stroje. Pro zjednodušení výpočtu přetvoření u šestihranné hlavy, bylo vyjádřeno jako přetvoření opsané kružnice.

3.1 Výpočet objemu

Jako první byl vypočítán objem protlačku potřebný ke správné volbě polotovaru. Při tváření za studena se využívá platnosti zákona o zachování objemu, z něhož vyplývá, že objem polotovaru bude stejný jako výlisku. Nejdříve byl rozdělen šroub na několik dílčích částí, u kterých byl vypočítán objem. Výsledek byl ověřen pomocí programu SOLIDWORKS 2019. Pro výpočet objemu byly použity vzorce:

Objem válce:

$$V_v = h_v \cdot S_v = h_v \cdot \frac{\pi \cdot D_v^2}{4} \quad [mm^3] \quad (3.1)$$

kde: h_v – výška válce [mm]

S_v – obsah kruhu [mm²]

D_v – průměr válce [mm]

Objem šestihranného hranolu:

$$V_s = h_s \cdot S_s = h_s \cdot \frac{3 \cdot \sqrt{3}}{2} \cdot a_s^2 \quad [mm^3] \quad (3.2)$$

kde: h_s – výška šestihranu [mm]

S_s – obsah šestihranu [mm²]

a_s – délka strany šestihranu [mm]

Objem komolého kužele:

$$V_{kk} = \frac{\pi \cdot h_{kk}}{3} \cdot (r_{kk1}^2 + r_{kk} \cdot r_{kk2} + r_{kk2}^2) \quad [mm^3] \quad (3.3)$$

kde: h_{kk} – výška kuželu [mm]

r_{kk1} – poloměr dolní podstavy [mm]

r_{kk2} – poloměr horní podstavy [mm]

Objem kužele:

$$V_k = \frac{1}{3} \cdot \frac{\pi \cdot D_{ku}^2}{4} \cdot h_k \quad [mm^3] \quad (3.4)$$

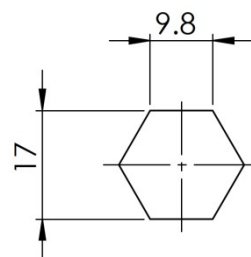
kde: D_{ku} – průměr kužele [mm]

h_k – výška kužele [mm]

Výpočet jednotlivých objemů:

Výpočet objemu šestihranu V_{s1} dle (3.2)

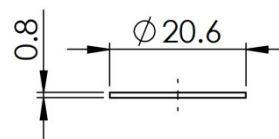
$$V_{s1} = h_{41} \cdot \frac{3 \cdot \sqrt{3}}{2} \cdot a_{41}^2 = 15,9 \cdot \frac{3 \cdot \sqrt{3}}{2} \cdot 9,8^2 = 3967 \text{ mm}^3$$



Obr. 26 Objem V_{s1}

Výpočet objemu válce V_{v2} dle (3.1):

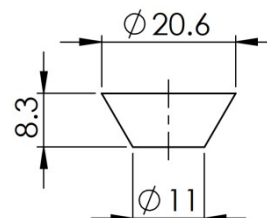
$$V_{v2} = h_{42} \cdot S_{v2} = h_{42} \cdot \frac{\pi \cdot D_{43}^2}{4} = 0.8 \cdot \frac{\pi \cdot 20,6^2}{4} = 267 \text{ mm}^3$$



Obr. 27 Objem V_{v2}

Výpočet objemu komolého kužele V_{kk3} dle (3.3):

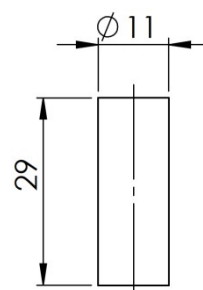
$$\begin{aligned} V_{kk3} &= \frac{\pi \cdot h_{43}}{3} \cdot (r_{44}^2 + r_{44} \cdot r_{43} + r_{43}^2) = \\ &= \frac{\pi \cdot 8.3}{3} \cdot (5.5^2 + 5.5 \cdot 10.3 + 10.3^2) = 1677 \text{ mm}^3 \end{aligned}$$



Obr. 28 Objem V_{kk3}

Výpočet objemu válce V_{v4} dle (3.1):

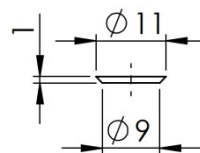
$$V_{v4} = h_{44} \cdot S_{v4} = h_{44} \cdot \frac{\pi \cdot D_{44}^2}{4} = 29 \cdot \frac{\pi \cdot 11^2}{4} = 2956 \text{ mm}^3$$



Obr. 29 Objem V_{v4}

Výpočet objemu komolého kužele V_{kk5} dle (3.3):

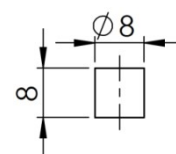
$$\begin{aligned} V_{kk5} &= \frac{\pi \cdot h_{45}}{3} \cdot (r_{44}^2 + r_{44} \cdot r_{45} + r_{45}^2) = \\ &= \frac{\pi \cdot 1}{3} \cdot (4.5^2 + 4.5 \cdot 5.5 + 5.5^2) = 79 \text{ mm}^3 \end{aligned}$$



Obr. 30 Objem V_{kk5}

Výpočet objemu válcového otvoru V_{v6} dle (3.1):

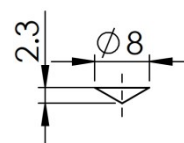
$$V_{v6} = h_{46} \cdot S_{v6} = h_{46} \cdot \frac{\pi \cdot D_{42}^2}{4} = 8 \cdot \frac{\pi \cdot 8^2}{4} = 402 \text{ mm}^3$$



Obr. 31 Objem V_{v6}

Objem kuželové díry V_{k7} dle (3.4):

$$V_{k7} = \frac{1}{3} \cdot \frac{\pi \cdot D_{42}^2}{4} \cdot h_{47} = \frac{1}{3} \cdot \frac{\pi \cdot 8^2}{4} \cdot 2,3 = 39 \text{ mm}^3$$



Obr. 32 Objem V_{k7}

Celkový objem:

$$\begin{aligned} V_c &= V_{s1} + V_{v2} + V_{kk3} + V_{v4} + V_{kk5} - V_{v6} - V_{k7} \quad [\text{mm}^3] \\ V_c &= 3967 + 267 + 1677 + 2956 + 79 - 402 - 39 = 8505 \text{ mm}^3 \end{aligned} \quad (3.5)$$

Pomocí programu SOLIDWORKS 2019 byl určen objem 8330 mm³. Rozdíl mezi hodnotou zjištěnou pomocí programu a vypočítanou pomocí rovnic je menší než 5%. Pro další výpočty byl použit objem určený pomocí softwaru, protože se u něj předpokládá větší přesnost.

3.2 Varianty výroby

Výroba součásti bude probíhat na tvářecím automatu, v první operaci dojde k ustřižení polotovaru z drátu, poté v průběhu několika operací bude vylisována součást a poté se bude zhotovovat závit. Pro výrobu závitu byly uvažovány 2 varianty a to obráběním, nebo objemovým tvářením. Při obrábění bude průměr dříku 12 mm. Nevýhodou technologie obrábění je přerušování vláken materiálu a delší výrobní čas. Z toho důvodu byla upřednostněna metoda tvářením a průměr dříku bude 11 mm.

Variantu polotovaru 1

Průměr polotovaru bude zvolen podle předpokladu stejného zpevnění nejmenšího a největšího průměru. Délka bude vycházet z podmínky stejného objemu polotovaru a protlačku.

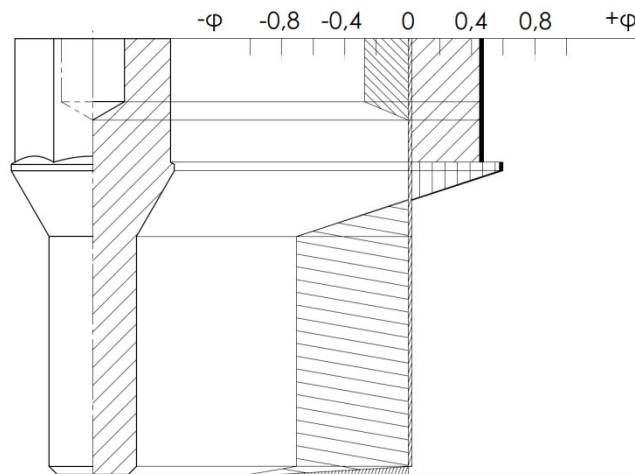
Průměr polotovaru:

$$\begin{aligned} \varphi_{h1} &= \varphi_{d1} \\ \ln \frac{D_{43}^2}{D_1^2} + \ln \left(\frac{D_{43}^2}{D_{43}^2 - D_{32}^2} \right) &= \ln \frac{D_1^2}{D_{44}^2} \\ D_1 &= \sqrt[4]{\frac{D_{43}^2 \cdot D_{44}^2}{D_{43}^2 - D_{32}^2}} = \sqrt[4]{\frac{20,6^4 \cdot 11^2}{20,6^2 - 8^2}} = 15,7 \text{ mm} \end{aligned} \quad (3.6)$$

Jako polotovar byl zvolen drát o průměru $D_0 = 15,5 \text{ mm}$.

Výpočet logaritmického přetvoření pro polotovar 1:

$$\begin{aligned} \varphi_{h1} &= \left| \ln \frac{D_{11}^2}{D_0^2} \right| + \left| \ln \frac{D_{31}^2 - D_{32}^2}{D_{21}^2} \right| + \left| \ln \frac{D_{41}^2 - D_{42}^2}{D_{31}^2 - D_{32}^2} \right| + \left| \ln \frac{D_{31}^2}{D_{11}^2} \right| + \left| \ln \frac{D_{41}^2}{D_{31}^2} \right| = \\ &= \left| \ln \frac{15,7^2}{15,5^2} \right| + \left| \ln \frac{19,4^2 - 7,6^2}{15,7^2} \right| + \left| \ln \frac{19,6^2 - 8^2}{19,4^2 - 7,6^2} \right| + \left| \ln \frac{19,4^2}{15,7^2} \right| + \left| \ln \frac{19,6^2}{19,4^2} \right| = 0,731 \\ \varphi_{h2} &= \left| \ln \frac{D_{11}^2}{D_0^2} \right| + \left| \ln \frac{D_{31}^2}{D_{11}^2} \right| + \left| \ln \frac{D_{41}^2}{D_{31}^2} \right| = \left| \ln \frac{15,7^2}{15,5^2} \right| + \left| \ln \frac{19,4^2}{15,7^2} \right| + \left| \ln \frac{19,6^2}{19,4^2} \right| = 0,469 \\ \varphi_{h3} &= \left| \ln \frac{D_{11}^2}{D_0^2} \right| + \left| \ln \frac{D_{33}^2}{D_{11}^2} \right| + \left| \ln \frac{D_{43}^2}{D_{33}^2} \right| = \left| \ln \frac{15,7^2}{15,5^2} \right| + \left| \ln \frac{20,2^2}{15,7^2} \right| + \left| \ln \frac{20,6^2}{20,2^2} \right| = 0,569 \\ \varphi_{d1} &= \left| \ln \frac{D_{11}^2}{D_0^2} \right| + \left| \ln \frac{D_{11}^2}{D_{22}^2} \right| = \left| \ln \frac{15,7^2}{15,5^2} \right| + \left| \ln \frac{15,7^2}{11^2} \right| = 0,737 \\ \varphi_{d2} &= \left| \ln \frac{D_0^2}{D_{12}^2} \right| + \left| \ln \frac{D_{12}^2}{D_{23}^2} \right| = \left| \ln \frac{15,5^2}{10^2} \right| + \left| \ln \frac{10^2}{9^2} \right| = 1,087 \end{aligned}$$



Obr. 33 Diagram logaritmického přetvoření pro variantu 1

Varianta polotovaru 2

Průměr polotovaru bude zvolen podle předpokladu stejného zpevnění nejmenšího průměru a hlavy šroubu.

Průměr polotovaru:

$$\varphi_{h3} = \varphi_{d1} \quad (3.7)$$

$$\ln \frac{D_{43}^2}{D_1^2} = \ln \frac{D_1^2}{D_{44}^2}$$

$$D_1 = \sqrt[4]{D_{43}^2 \cdot D_{44}^2} = \sqrt[4]{20,6^2 \cdot 11^2} = 15,1 \text{ mm}$$

Jako polotovar byl zvolen drát o průměru $D_0 = 15 \text{ mm}$.

Výpočet logaritmického přetvoření pro variantu 2:

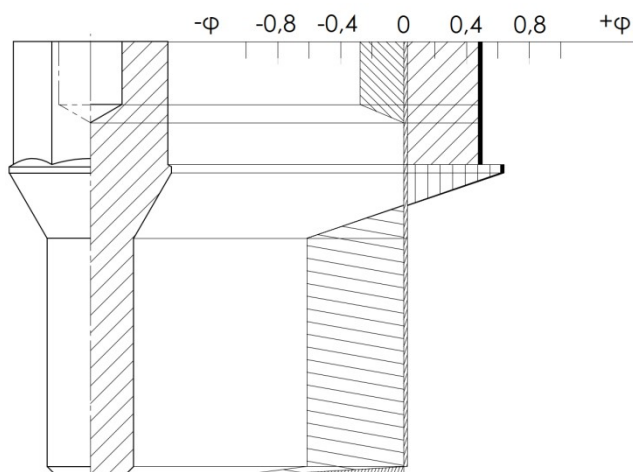
$$\begin{aligned} \varphi_{h1} &= \left| \ln \frac{D_{11}^2}{D_0^2} \right| + \left| \ln \frac{D_{31}^2 - D_{32}^2}{D_{21}^2} \right| + \left| \ln \frac{D_{41}^2 - D_{42}^2}{D_{31}^2 - D_{32}^2} \right| + \left| \ln \frac{D_{31}^2}{D_{11}^2} \right| + \left| \ln \frac{D_{41}^2}{D_{31}^2} \right| = \\ &= \left| \ln \frac{15,1^2}{15^2} \right| + \left| \ln \frac{19,4^2 - 7,6^2}{15,1^2} \right| + \left| \ln \frac{19,6^2 - 8^2}{19,4^2 - 7,6^2} \right| + \left| \ln \frac{19,4^2}{15,1^2} \right| + \left| \ln \frac{19,6^2}{19,4^2} \right| = 0,874 \end{aligned}$$

$$\varphi_{h2} = \left| \ln \frac{D_{11}^2}{D_0^2} \right| + \left| \ln \frac{D_{31}^2}{D_{11}^2} \right| + \left| \ln \frac{D_{41}^2}{D_{31}^2} \right| = \left| \ln \frac{15,1^2}{15^2} \right| + \left| \ln \frac{19,4^2}{15,1^2} \right| + \left| \ln \frac{19,6^2}{19,4^2} \right| = 0,535$$

$$\varphi_{h3} = \left| \ln \frac{D_{11}^2}{D_0^2} \right| + \left| \ln \frac{D_{33}^2}{D_{11}^2} \right| + \left| \ln \frac{D_{43}^2}{D_{33}^2} \right| = \left| \ln \frac{15,1^2}{15^2} \right| + \left| \ln \frac{20,2^2}{15,1^2} \right| + \left| \ln \frac{20,6^2}{20,2^2} \right| = 0,634$$

$$\varphi_{d1} = \left| \ln \frac{D_{11}^2}{D_0^2} \right| + \left| \ln \frac{D_{11}^2}{D_{22}^2} \right| = \left| \ln \frac{15,1^2}{15^2} \right| + \left| \ln \frac{15,1^2}{11^2} \right| = 0,637$$

$$\varphi_{d2} = \left| \ln \frac{D_0^2}{D_{12}^2} \right| + \left| \ln \frac{D_{12}^2}{D_{23}^2} \right| = \left| \ln \frac{15^2}{10^2} \right| + \left| \ln \frac{10^2}{9^2} \right| = 1,022$$



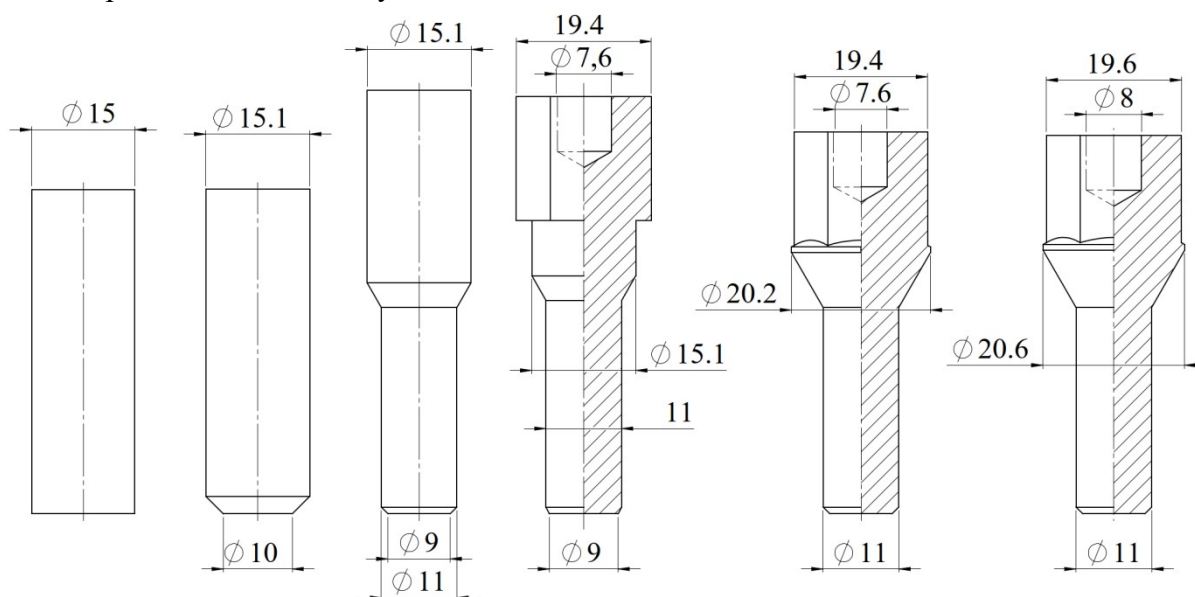
Obr. 34 Diagram logaritmického přetvoření pro variantu 2

Z uvažovaných polotovarů byla upřednostněna varianta 2, u které je menší logaritmické přetvoření na dříku, na kterém se bude tvářet závit. Dále bude počítáno s průměrem drátu $D_0 = 15$ mm a průměrem po předpěchování $D_1 = 15,1$ mm.

Varianta postupu A:

střih

1. operace předpěchování
2. operace dopředné protlačování dříku
3. operace pěchování hlavy a zpětné protlačování otvoru
4. operace stranové protlačování kužele hlavy
5. operace kalibrace hlavy

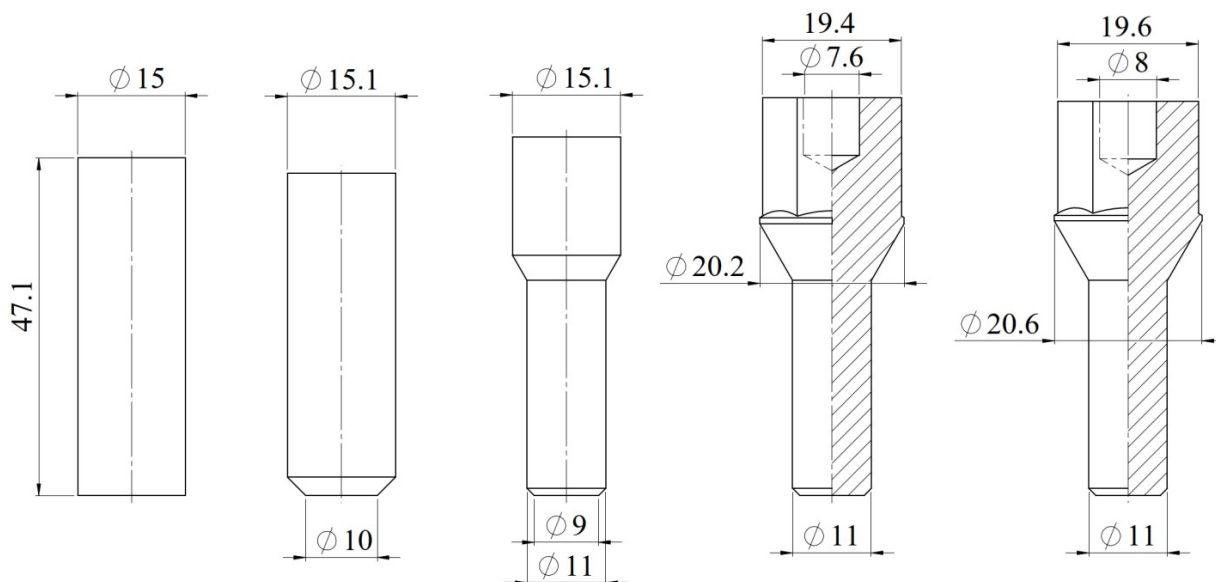


Obr. 35 Tvářecí postup pro variantu A

Varianta postupu B:

střih

1. operace předpěchování
2. operace dopředné protlačování dříku
3. operace pěchování kužele, hlavy a zpětné protlačování otvoru
4. operace kalibrace hlavy



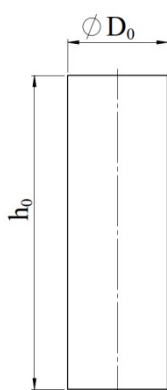
Obr. 36 Tvářecí postup pro variantu B

Byl zvolen tvářecí postup B, hlavním kritériem byl menší počet operací a tím pádem jednodušší a levnější nástroj.

3.3 Výpočet rozměrů součásti

Pro zvolenou variantu je nutné vypočítat rozměry v jednotlivých operacích. Polotovár je drát o průměru $D_0 = 15 \text{ mm}$. Objem součásti je $V_c = 8330 \text{ mm}^3$. Délka polotovaru bude vycházet z podmínky stálého objemu.

Střih:



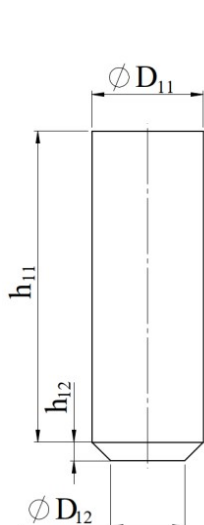
$$V_c = h_0 \cdot \frac{\pi \cdot D_0^2}{4} \quad [\text{mm}^3] \quad (3.8)$$

$$h_0 = \frac{4 \cdot V_c}{\pi \cdot D_0^2}$$

$$h_0 = \frac{4 \cdot 8330}{\pi \cdot 15^2} = 47,1 \text{ mm}$$

Obr. 37 Rozměry po operaci střih

1. operace předpěchování:



Obr. 38 Rozměry po 1. operaci

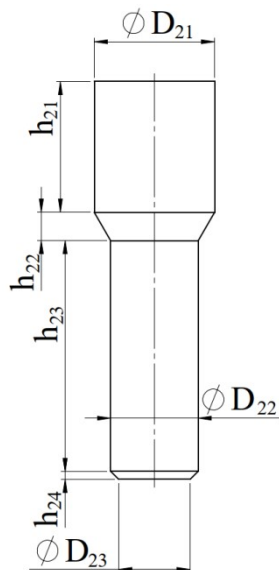
$$V_c = \frac{\pi \cdot h_{12}}{3} \cdot (r_{12}^2 + r_{12} \cdot r_{11} + r_{11}^2) + h_{11} \cdot \frac{\pi \cdot D_{11}^2}{4} \quad [mm^3] \quad (3.9)$$

$$h_{11} = \frac{V_c - \frac{\pi \cdot h_{12}}{3} \cdot (r_{12}^2 + r_{12} \cdot r_{11} + r_{11}^2)}{\frac{\pi \cdot D_{11}^2}{4}}$$

$$h_{11} = \frac{8330 - \frac{\pi \cdot 2,6}{3} \cdot (5,5^2 + 5,5 \cdot 7,55 + 7,55^2)}{\frac{\pi \cdot 15,1^2}{4}}$$

$$h_{11} = 44,6 \text{ mm}$$

2. operace dopředné protlačování:



Obr. 39 Rozměry po 2. operaci

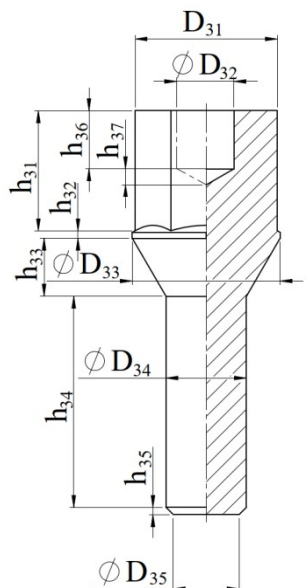
$$V_c = \frac{\pi \cdot h_{24}}{3} \cdot (r_{23}^2 + r_{23} \cdot r_{22} + r_{22}^2) + h_{23} \cdot \frac{\pi \cdot D_{22}^2}{4} + \frac{\pi \cdot h_{22}}{3} \cdot (r_{22}^2 + r_{22} \cdot r_{21} + r_{11}^2) + h_{21} \cdot \frac{\pi \cdot D_{21}^2}{4} \quad [mm^3] \quad (3.10)$$

$$h_{21} = \frac{V_c - \frac{\pi \cdot h_{24}}{3} \cdot (r_{23}^2 + r_{23} \cdot r_{22} + r_{22}^2)}{\frac{\pi \cdot D_{21}^2}{4}} + \frac{-h_{23} \cdot \frac{\pi \cdot D_{22}^2}{4} - \frac{\pi \cdot h_{22}}{3} \cdot (r_{22}^2 + r_{22} \cdot r_{21} + r_{11}^2)}{\frac{\pi \cdot D_{21}^2}{4}}$$

$$h_{21} = \frac{8330 - \frac{\pi \cdot 1}{3} \cdot (4,5^2 + 4,5 \cdot 5,5 + 5,5^2) - 29 \cdot \frac{\pi \cdot 11^2}{4} - \frac{\pi \cdot 3,6}{3} \cdot (5,5^2 + 5,5 \cdot 7,55 + 7,55^2)}{\frac{\pi \cdot 15,1^2}{4}}$$

$$h_{21} = 28 \text{ mm}$$

3. operace přechování kužele, hlavy a zpětné protlačování otvoru:



Obr. 40 Rozměry po
3. operaci

$$V_c = \frac{\pi \cdot h_{35}}{3} \cdot (r_{35}^2 + r_{35} \cdot r_{34} + r_{34}^2) + h_{34} \cdot \frac{\pi \cdot D_{34}^2}{4} +$$

$$+ \frac{\pi \cdot h_{33}}{3} \cdot (r_{34}^2 + r_{34} \cdot r_{33} + r_{33}^2) + h_{32} \cdot \frac{\pi \cdot D_{33}^2}{4} +$$

$$+ h_{31} \cdot \frac{3 \cdot \sqrt{3}}{2} \cdot a_{31}^2 - h_{36} \cdot \frac{\pi \cdot D_{32}^2}{4} - \frac{1}{3} \cdot \frac{\pi \cdot D_{32}^2}{4} \cdot h_{37} \text{ [mm}^3\text{]} \quad (3.11)$$

$$h_{32} = \frac{V_c - \frac{\pi \cdot h_{35}}{3} \cdot (r_{35}^2 + r_{35} \cdot r_{34} + r_{34}^2) - h_{34} \cdot \frac{\pi \cdot D_{34}^2}{4}}{\frac{\pi \cdot D_{33}^2}{4}} +$$

$$+ \frac{-\frac{\pi \cdot h_{33}}{3} \cdot (r_{34}^2 + r_{34} \cdot r_{33} + r_{33}^2) - h_{31} \cdot \frac{3 \cdot \sqrt{3}}{2} \cdot a_{31}^2 -}{\frac{\pi \cdot D_{33}^2}{4}} -$$

$$+ \frac{h_{36} \cdot \frac{\pi \cdot D_{32}^2}{4} + \frac{1}{3} \cdot \frac{\pi \cdot D_{32}^2}{4} \cdot h_{37}}{\frac{\pi \cdot D_{33}^2}{4}}$$

$$h_{32} = \frac{8330 - \frac{\pi \cdot 1}{3} \cdot (4,5^2 + 4,5 \cdot 5,5 + 5,5^2) - 29 \cdot \frac{\pi \cdot 11^2}{4}}{\frac{\pi \cdot 20,2^2}{4}} +$$

$$+ \frac{-\frac{\pi \cdot 8}{3} \cdot (5,5^2 + 5,5 \cdot 10,1 + 10,1^2) - 16,5 \cdot \frac{3 \cdot \sqrt{3}}{2} \cdot 9,7^2 + 7,6 \cdot \frac{\pi \cdot 8^2}{4} + \frac{1}{3} \cdot \frac{\pi \cdot 8^2}{4} \cdot 2,2}{\frac{\pi \cdot 20,2^2}{4}}$$

$$h_{32} = 0,95 \cong 1 \text{ mm}$$

3.4 Výpočet síly a práce

K určení tvářecí síly v jednotlivých operacích je nutné nejdříve zjistit přetvoření, ze kterého vypočítám deformační odpor podle polynomu 5. stupně pro ocel 11 320 5R (rovnice 3.11). V příloze 1 je diagram, ze kterého lze vyčíst hodnotu přetvárného odporu v závislosti na přetvoření, a jsou zde také uvedeny další vzorce pro výpočet logaritmického přetvoření. Dále je nutné vypočítat deformační odpor například podle rovnic 2.5, 2.6 a 2.7. Z deformačního odporu lze vypočítat tvářecí sílu a z ní následně i práci.

Polynom 5. stupně pro ocel 11 320 5R:

$$\sigma_p = 723,97 \cdot \varphi^5 - 2987,6 \cdot \varphi^4 + 4777,18 \cdot \varphi^3 -$$

$$- 3691,19 \cdot \varphi^2 + 1458,65 \cdot \varphi + 407,89 \text{ [MPa]} \quad (3.12)$$

Střih

$$F_0 = (1,15 \div 1,3) \cdot S_0 \cdot \tau_{ps} = (1,15 \div 1,3) \cdot \frac{\pi \cdot D_0^2}{4} \cdot \tau_{ps} \text{ [N]} \quad (3.13)$$

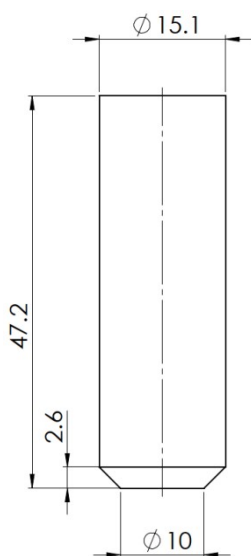
kde: τ_{ps} – deformační odpor ve střihu [MPa]

$$\tau_{ps} = 0,8 \cdot R_m \text{ [MPa]} \quad (3.14)$$

$$\tau_{ps} = 0,8 \cdot 280 = 224 \text{ MPa}$$

$$F_0 = 1,3 \cdot \frac{\pi \cdot 15^2}{4} \cdot 224 = 51\,460 \text{ N} = 51,46 \text{ kN}$$

1. operace předpěchování



Obr. 41 Rozměry dílu po 1. operaci

Logaritmické přetvoření pro předpěchování:

$$\varphi_1 = \left| \ln \frac{D_{11}^2}{D_0^2} \right| = \left| \ln \frac{15,1^2}{15^2} \right| = 0,013$$

Přirozený přetvárný odpor pro předpěchování:

$$\sigma_{p1} = 723,97 \cdot \varphi_1^5 - 2987,6 \cdot \varphi_1^4 + 4777,18 \cdot \varphi_1^3 - 3691,19 \cdot \varphi_1^2 + 1458,65 \cdot \varphi_1 + 407,89$$

$$\sigma_{p1} = 723,97 \cdot 0,013^5 - 2987,6 \cdot 0,013^4 + 4777,18 \cdot 0,013^3 - 3691,19 \cdot 0,013^2 + 1458,65 \cdot 0,013 + 407,89 = 426,2 \text{ MPa}$$

Deformační odpor pro pěchování dle Siebela:

$$\sigma_{d1} = \sigma_{p1} \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{f \cdot D_1}{h_1} \right)$$

$$\sigma_{d1} = 426,2 \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{0,1 \cdot 15,1}{47,2} \right) = 430,7 \text{ MPa}$$

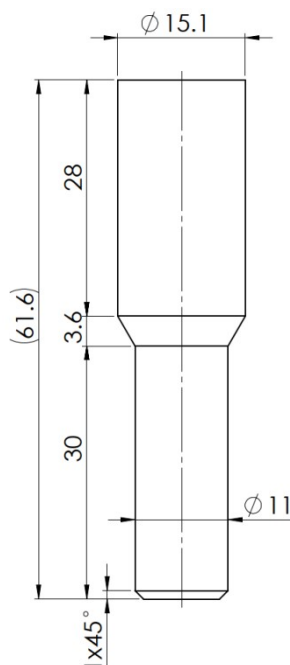
Tvářecí síla pro předpěchování:

$$F_1 = \sigma_{d1} \cdot S_1 = \sigma_{d1} \cdot \frac{\pi \cdot D_1^2}{4} = 430,7 \cdot \frac{\pi \cdot 15,1^2}{4} = 77\,130 \text{ N}$$

Přetvárná práce pro předpěchování:

$$A_1 = F_1 \cdot \Delta h = F_1 \cdot (h_1 - h_0) = 77\,130 \cdot (0,0472 - 0,0471) = 8 \text{ J}$$

2. operace dopředné protlačování dříku



Obr. 42 Rozměry dílu po 2. operaci

Logaritmické přetvoření pro protlačování:

$$\varphi_2 = \left| \ln \frac{D_{21}^2}{D_{22}^2} \right| + \left| \ln \frac{D_{11}^2}{D_0^2} \right| = \left| \ln \frac{15,1^2}{11^2} \right| + \left| \ln \frac{15,1^2}{15^2} \right| = 0,647$$

Střední hodnota přirozeného přetvárného odporu:

$$\varphi_{s2} = \frac{\varphi_2 + \varphi_1}{2} = \frac{0,647 + 0,013}{2} = 0,33$$

Přirozený přetvárný odpor pro předpěchování:

$$\sigma_{p2} = 723,97 \cdot \varphi_{s2}^5 - 2987,6 \cdot \varphi_{s2}^4 + 4777,18 \cdot \varphi_{s2}^3 - 3691,19 \cdot \varphi_{s2}^2 + 1458,65 \cdot \varphi_{s2} + 407,89$$

$$\sigma_{p2} = 723,97 \cdot 0,33^5 - 2987,6 \cdot 0,33^4 + 4777,18 \cdot 0,33^3 - 3691,19 \cdot 0,33^2 + 1458,65 \cdot 0,33 + 407,89$$

$$\sigma_{p2} = 626,4 \text{ MPa}$$

Deformační odpor pro protlačování dle Feldmanna:

$$\sigma_{d2} = \sigma_{p2} \cdot \left[\left(1 + \frac{f_2}{\alpha} \right) \cdot \ln \left(\frac{d_{21}}{d_{22}} \right)^2 + \frac{2}{3} \cdot \alpha \right] + 4 \cdot f_2 \cdot \frac{d_{22} \cdot l_k}{d_{21}^2} \cdot \sigma_{p2} + 4 \cdot f_1 \cdot \frac{l_p}{d_{21}} \cdot \sigma_{p1}$$

$$\sigma_{d2} = 626,4 \cdot \left[\left(1 + \frac{0,1}{0,577} \right) \cdot \ln \left(\frac{15,1}{11} \right)^2 + \frac{2}{3} \cdot 0,577 \right] +$$

$$+ 4 \cdot 0,1 \cdot \frac{11 \cdot 4}{15,1^2} \cdot 626,4 + 4 \cdot 0,1 \cdot \frac{28}{15,1} \cdot 426,2$$

$$\sigma_{d2} = 679,2 \text{ MPa}$$

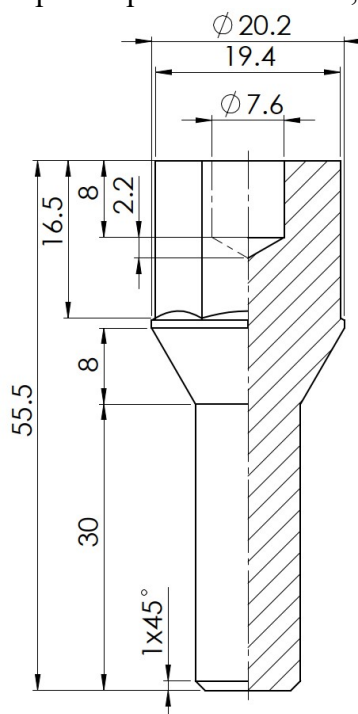
Tvářecí síla pro dopředné protlačování dříku :

$$F_2 = \sigma_{d2} \cdot S_2 = \sigma_{d2} \cdot \frac{\pi \cdot D_{21}^2}{4} = 679,2 \cdot \frac{\pi \cdot 15,1^2}{4} = 121\,630 \text{ N} \cong 122 \text{ kN}$$

Přetvárná práce pro dopředné protlačování dříku :

$$A_2 = F_2 \cdot \Delta h = F_2 \cdot (h_1 - h_{21}) = 122\,000 \cdot (0,0472 - 0,028) = 2342 \text{ J}$$

3. operace pěchování kužele, hlavy a zpětné protlačování otvoru



Obr. 43 Rozměry dílu po 4. operaci

Logaritmické přetvoření pro pěchování na $\varnothing 20,2$:

$$\varphi_3 = \left| \ln \frac{D_{11}^2}{D_0^2} \right| + \left| \ln \frac{D_{33}^2}{D_{11}^2} \right| = \left| \ln \frac{15,1^2}{15^2} \right| + \left| \ln \frac{20,2^2}{15,1^2} \right|$$

$$\varphi_3 = 0,595$$

Střední hodnota přirozeného přetvárného odporu:

$$\varphi_{s2} = \frac{\varphi_3 + \varphi_2}{2} = \frac{0,595 + 0,647}{2} = 0,621$$

Přirozený přetvárný odpor pro pěchování na $\varnothing 20,2$:

$$\sigma_{p3} = 723,97 \cdot \varphi_{s3}^5 - 2987,6 \cdot \varphi_{s3}^4 + 4777,18 \cdot \varphi_{s3}^3 -$$

$$- 3691,19 \cdot \varphi_{s3}^2 + 1458,65 \cdot \varphi_{s3} + 407,89$$

$$\sigma_{p3} = 723,97 \cdot 0,621^5 - 2987,6 \cdot 0,621^4 +$$

$$+ 4777,18 \cdot 0,621^3 - 3691,19 \cdot 0,621^2 +$$

$$+ 1458,65 \cdot 0,621 + 407,89 = 656,8 \text{ MPa}$$

Deformační odpor pro pěchování na $\varnothing 20,2$ dle Siebela:

$$\sigma_{d3} = \sigma_{p3} \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{f \cdot D_{33}}{h_3} \right)$$

$$\sigma_{d3} = 656,8 \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{0,1 \cdot 20,2}{9} \right) = 705,9 \text{ MPa}$$

Tvářecí síla pro pěchování na $\varnothing 20,2$:

$$F_3 = \sigma_{d3} \cdot S_3 = \sigma_{d3} \cdot \frac{\pi \cdot D_{33}^2}{4} = 705,9 \cdot \frac{\pi \cdot 20,2^2}{4} = 226\,222 \text{ N} \cong 226 \text{ kN}$$

Přetvárná práce pro pěchování na $\varnothing 20,2$:

$$A_3 = F_1 \cdot \Delta h = 226\,000 \cdot 0,0075 = 1695 \text{ J}$$

Logaritmické přetvoření pro pěchování šestihhranné hlavy:

$$\varphi_4 = \left| \ln \frac{D_{11}^2}{D_0^2} \right| + \left| \ln \frac{D_{31}^2}{D_{11}^2} \right| = \left| \ln \frac{15,1^2}{15^2} \right| + \left| \ln \frac{19,4^2}{15,1^2} \right| = 0,514$$

Střední hodnota přirozeného přetvárného odporu:

$$\varphi_{s4} = \frac{\varphi_3 + \varphi_2}{2} = \frac{0,514 + 0,647}{2} = 0,581$$

Přirozený přetvárný odpor pro pětování šestihránné hlavy:

$$\sigma_{p4} = 723,97 \cdot \varphi_{s4}^5 - 2987,6 \cdot \varphi_{s4}^4 + 4777,18 \cdot \varphi_{s4}^3 - 3691,19 \cdot \varphi_{s4}^2 + 1458,65 \cdot \varphi_{s4} + 407,89$$

$$\sigma_{p4} = 723,97 \cdot 0,581^5 - 2987,6 \cdot 0,581^4 + 4777,18 \cdot 0,581^3 - 3691,19 \cdot 0,581^2 + 1458,65 \cdot 0,581 + 407,89 = 653,8 \text{ MPa}$$

Deformační odpor pro pětování šestihránné hlavy dle Siebela:

$$\sigma_{d4} = \sigma_{p4} \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{f \cdot D_{31}}{h_{31}}\right)$$

$$\sigma_{d4} = 653,8 \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{0,1 \cdot 19,4}{16,5}\right) = 677,4 \text{ MPa}$$

Tvářecí síla pro pětování šestihránné hlavy:

$$F_4 = \sigma_{d4} \cdot S_4 = \sigma_{d4} \cdot \frac{\pi \cdot D_{31}^2}{4} = 679,4 \cdot \frac{\pi \cdot 19,4^2}{4} = 200\,825 \text{ N} \cong 201 \text{ kN}$$

Přetvárná práce pro pětování šestihránné hlavy:

$$A_4 = F_4 \cdot \Delta h = 201\,000 \cdot 0,0127 = 2553 \text{ J}$$

Logaritmické přetvoření pro zpětné protlačování:

$$\varphi_5 = \left| \ln \frac{D_{11}^2}{D_0^2} \right| + \left| \ln \frac{D_{21}^2 - D_{32}^2}{D_{21}^2} \right| = \left| \ln \frac{15,1^2}{15^2} \right| + \left| \ln \frac{15,1^2 - 7,6^2}{15,1^2} \right| = 0,305$$

Střední hodnota přirozeného přetvárného odporu:

$$\varphi_{s5} = \frac{\varphi_5 + \varphi_2}{2} = \frac{0,305 + 0,647}{2} = 0,476$$

Přirozený přetvárný odpor pro zpětné protlačování:

$$\sigma_{p5} = 723,97 \cdot \varphi_{s5}^5 - 2987,6 \cdot \varphi_{s5}^4 + 4777,18 \cdot \varphi_{s5}^3 - 3691,19 \cdot \varphi_{s5}^2 + 1458,65 \cdot \varphi_{s5} + 407,89$$

$$\sigma_{p5} = 723,97 \cdot 0,476^5 - 2987,6 \cdot 0,476^4 + 4777,18 \cdot 0,476^3 - 3691,19 \cdot 0,476^2 + 1458,65 \cdot 0,476 + 407,89 = 645,4 \text{ MPa}$$

Deformační odpor pro zpětné protlačování dle Siebela:

$$\sigma_{d5} = 1,152 \cdot \sigma_{p5} \cdot \frac{D_{21}^2}{D_{32}^2} \cdot \left(\log \frac{D_{21}^2}{D_{21}^2 - D_{32}^2} + \frac{D_{21}^2}{D_{21}^2 - D_{32}^2} \cdot \log \frac{D_{21}^2}{D_{32}^2} + \log \frac{D_{32}^2}{D_{21}^2 - D_{32}^2} \right)$$

Podmínka pro použití zpětného protlačování dle Siebela:

$$s > 0,1 \cdot D_{21}$$

$$4,6 > 0,1 \cdot 15,1$$

$$4,6 > 1,51$$

$$\sigma_{d5} = 1,152 \cdot 621 \cdot \frac{15,1^2}{7,6^2} \cdot$$

$$\cdot \left(\log \frac{15,1^2}{15,1^2 - 7,6^2} + \frac{15,1^2}{15,1^2 - 7,6^2} \cdot \log \frac{15,1^2}{7,6^2} + \log \frac{7,6^2}{15,1^2 - 7,6^2} \right)$$

$$\sigma_{d5} = 1897,6 \text{ MPa}$$

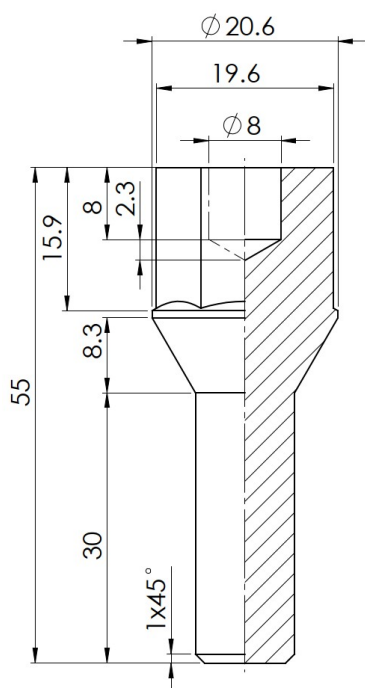
Tvářecí síla pro zpětné protlačování:

$$F_5 = \sigma_{d5} \cdot S_5 = \sigma_{d5} \cdot \frac{\pi \cdot D_{32}^2}{4} = 1897,6 \cdot \frac{\pi \cdot 7,6^2}{4} = 86\,080\,N \cong 86\,kN$$

Přetvárná práce pro zpětné protlačování:

$$A_5 = F_5 \cdot \Delta h = 86\,000 \cdot 0,008 = 688\,J$$

4. operace kalibrace hlavy



Obr. 44 Rozměry dílu po 4. operaci

Logaritmické přetvoření pro pěchování na $\varnothing 20,6$:

$$\begin{aligned} \varphi_6 &= \left| \ln \frac{D_{11}^2}{D_0^2} \right| + \left| \ln \frac{D_{33}^2}{D_{11}^2} \right| + \left| \ln \frac{D_{43}^2}{D_{33}^2} \right| = \\ &= \left| \ln \frac{15,1^2}{15^2} \right| + \left| \ln \frac{20,2^2}{15,1^2} \right| + \left| \ln \frac{20,6^2}{20,2^2} \right| \\ \varphi_6 &= 0,634 \end{aligned}$$

Střední hodnota přirozeného přetvárného odporu:

$$\varphi_{s6} = \frac{\varphi_6 + \varphi_3}{2} = \frac{0,634 + 0,621}{2} = 0,628$$

Přirozený přetvárný odpor pro pěchování na $\varnothing 20,6$:

$$\begin{aligned} \sigma_{p6} &= 723,97 \cdot \varphi_{s6}^5 - 2987,6 \cdot \varphi_{s6}^4 + 4777,18 \cdot \varphi_{s6}^3 - \\ &\quad - 3691,19 \cdot \varphi_{s6}^2 + 1458,65 \cdot \varphi_{s6} + 407,89 \\ \sigma_{p6} &= 723,97 \cdot 0,628^5 - 2987,6 \cdot 0,628^4 + \\ &\quad + 4777,18 \cdot 0,628^3 - 3691,19 \cdot 0,628^2 + \\ &\quad + 1458,65 \cdot 0,628 + 407,89 = 657,4\,MPa \end{aligned}$$

Deformační odpor pro pěchování na $\varnothing 20,6$ dle Siebela:

$$\begin{aligned} \sigma_{d6} &= \sigma_{p3} \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{f \cdot D_{43}}{h_4} \right) \\ \sigma_{d6} &= 657,4 \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{0,1 \cdot 20,6}{9,1} \right) = 707\,MPa \end{aligned}$$

Tvářecí síla pro pěchování na $\varnothing 20,6$:

$$F_6 = \sigma_{d6} \cdot S_6 = \sigma_{d6} \cdot \frac{\pi \cdot D_{43}^2}{4} = 707 \cdot \frac{\pi \cdot 20,6^2}{4} = 235\,637\,N \cong 236\,kN$$

Přetvárná práce pro pěchování na $\varnothing 20,2$:

$$A_6 = F_1 \cdot \Delta h = F_1 \cdot (h_{42} - h_{32}) = 236\,000 \cdot (0,0083 - 0,008) = 71\,J$$

Logaritmické přetvoření pro pěchování šestihranné hlavy:

$$\varphi_7 = \left| \ln \frac{D_{11}^2}{D_0^2} \right| + \left| \ln \frac{D_{31}^2}{D_{11}^2} \right| + \left| \ln \frac{D_{41}^2}{D_{31}^2} \right| = \left| \ln \frac{15,1^2}{15^2} \right| + \left| \ln \frac{19,4^2}{15,1^2} \right| + \left| \ln \frac{19,7^2}{19,4^2} \right| = 0,031$$

Střední hodnota přirozeného přetvárného odporu:

$$\varphi_{s7} = \frac{\varphi_7 + \varphi_4}{2} = \frac{0,031 + 0,514}{2} = 0,273$$

Přirozený přetvárný odpor pro pěchování šestihranné hlavy:

$$\begin{aligned} \sigma_{p7} &= 723,97 \cdot \varphi_{s7}^5 - 2987,6 \cdot \varphi_{s7}^4 + 4777,18 \cdot \varphi_{s7}^3 - \\ &\quad - 3691,19 \cdot \varphi_{s7}^2 + 1458,65 \cdot \varphi_{s7} + 407,89 \end{aligned}$$

$$\sigma_{p7} = 723,97 \cdot 0,273^5 - 2987,6 \cdot 0,273^4 + 4777,18 \cdot 0,273^3 - 3691,19 \cdot 0,273^2 + 1458,65 \cdot 0,273 + 407,89$$

$$\sigma_{p7} = 612,7 \text{ MPa}$$

Deformační odpor pro pýchování šestihřanné hlavy dle Siebela:

$$\sigma_{d7} = \sigma_{p7} \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{f \cdot D_{41}}{h_{41}}\right) = 612,7 \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{0,1 \cdot 19,7}{16,5}\right) = 637,1 \text{ MPa}$$

Tvářecí síla pro pýchování šestihřanné hlavy:

$$F_7 = \sigma_{d7} \cdot S_7 = \sigma_{d7} \cdot \frac{\pi \cdot D_{41}^2}{4} = 637,1 \cdot \frac{\pi \cdot 19,7^2}{4} = 194\,191 \text{ N} \cong 194 \text{ kN}$$

Přetvárná práce pro pýchování šestihřanné hlavy:

$$A_7 = F_7 \cdot \Delta h = F_7 \cdot (h_{41} - h_{31}) = 194\,000 \cdot (0,0165 - 0,0159) = 116 \text{ J}$$

Logaritmické přetvoření pro zpětné protlačování:

$$\varphi_8 = \left| \ln \frac{D_{11}^2}{D_0^2} \right| + \left| \ln \frac{D_{21}^2 - D_{32}^2}{D_{21}^2} \right| + \left| \ln \frac{D_{41}^2 - D_{42}^2}{D_{31}^2 - D_{32}^2} \right|$$

$$\varphi_8 = \left| \ln \frac{15,1^2}{15^2} \right| + \left| \ln \frac{15,1^2 - 7,6^2}{15,1^2} \right| + \left| \ln \frac{19,7^2 - 8^2}{19,4^2 - 7,6^2} \right| = 0,322$$

Střední hodnota přirozeného přetvárného odporu:

$$\varphi_{s8} = \frac{\varphi_8 + \varphi_5}{2} = \frac{0,322 + 0,305}{2} = 0,314$$

Přirozený přetvárný odpor pro zpětné protlačování:

$$\sigma_{p8} = 723,97 \cdot \varphi_{s8}^5 - 2987,6 \cdot \varphi_{s8}^4 + 4777,18 \cdot \varphi_{s8}^3 - 3691,19 \cdot \varphi_{s8}^2 + 1458,65 \cdot \varphi_{s8} + 407,89$$

$$\sigma_{p8} = 723,97 \cdot 0,314^5 - 2987,6 \cdot 0,314^4 + 4777,18 \cdot 0,314^3 - 3691,19 \cdot 0,314^2 + 1458,65 \cdot 0,314 + 407,89 = 623 \text{ MPa}$$

Deformační odpor pro zpětné protlačování dle Siebela:

$$\sigma_{d8} = 1,152 \cdot \sigma_{p8} \cdot \frac{D_{31}^2}{D_{42}^2} \cdot \left(\log \frac{D_{31}^2}{D_{31}^2 - D_{42}^2} + \frac{D_{31}^2}{D_{31}^2 - D_{42}^2} \cdot \log \frac{D_{31}^2}{D_{42}^2} + \log \frac{D_{42}^2}{D_{31}^2 - D_{42}^2} \right)$$

Podmínka pro použití zpětného protlačování dle Siebela:

$$s > 0,1 \cdot D_{31}$$

$$4,6 > 0,1 \cdot 19,4$$

$$4,6 > 1,94$$

$$\sigma_{d8} = 1,152 \cdot 624,7 \cdot \frac{19,4^2}{8^2} \cdot \left(\log \frac{19,4^2}{19,4^2 - 8^2} + \frac{19,4^2}{19,4^2 - 8^2} \cdot \log \frac{19,4^2}{8^2} + \log \frac{8^2}{19,4^2 - 8^2} \right)$$

$$\sigma_{d8} = 3398,3 \text{ MPa}$$

Tvářecí síla pro zpětné protlačování:

$$F_8 = \sigma_{d8} \cdot S_8 = \sigma_{d8} \cdot \frac{\pi \cdot D_{42}^2}{4} = 3398,3 \cdot \frac{\pi \cdot 8^2}{4} = 170\,820 \text{ N} \cong 171 \text{ kN}$$

Přetvárná práce pro zpětné protlačování:

$$A_8 = F_8 \cdot \Delta h = F_8 \cdot (h_{47} - h_{37}) = 171\,000 \cdot (0,0023 - 0,0022) = 17 \text{ J}$$

Celková tvářecí síla:

$$F_c = \sum_{i=1}^{n=8} F_i = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5 + F_6 + F_7 + F_8 \quad [kN] \quad (3.15)$$

$$F_c = 77 + 122 + 226 + 201 + 86 + 236 + 194 + 171 = 1\,313 \text{ kN}$$

$$A_c = \sum_{i=1}^{n=8} A_i = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5 + A_6 + A_7 + A_8 \quad [J] \quad (3.16)$$

$$A_c = 8 + 2342 + 1695 + 2553 + 688 + 71 + 116 + 17 = 7\,490 \text{ J}$$

3.5 Volba stroje [23]

Pro volbu tvářecího stroje je nutné zvolit nejvhodnější typ stroje, s ohledem na velikost série a složitost dílu je nejvýhodnější využití tvářecího automatu, který odstříhne polotovar ze svitku a provede všechny operace v jednom zdvihu. Nejdůležitějšími parametry je tvářecí síla a počet tvářecích operací. Ke zhotovení zadané součásti podle zvoleného postupu je nutné, aby stroj mohl provádět minimálně 4 operace, jeho tvářecí síla byla větší než 1 313 kN. S ohledem na tyto podmínky byl zvolen tvářecí automat (obr. 45) TPZK 25 od firmy ŠMERAL a.s., jeho parametry jsou v tabulce 4.



Obr. 45 Postupový automat TPZK 25 [23]

Tab. 4 Některé parametry tvářecího automatu

Parametr	Hodnota	Jednotka
jmenovitý průměr zpracovaného materiálu	25	mm
pevnost do	600	MPa
délka ústřížku	25-85	mm
počet zdvihů – počet výlisků za minutu	40-80	-
jmenovitá síla	5000	kN
střížná síla	200	kN
zdvih beranu	220	mm
výkon hlavního elektromotoru	74	kW

3.6 Návrh postupového nástroje

Součástí práce je i výkres sestavy nástroje, který se skládá z pěti bloků, to zahrnuje všechny čtyři tvářecí operace a stříh. Byly vytvořeny také výkresy průtlačníku a průtlačnice pro druhou operaci, tedy dopředné protlačování. Rozměry byly zvoleny podle geometrických parametrů průtlačníku (obr. 46) a průtlačnice (obr. 47). Byla upřednostněna varianta průtlačníku s válcovou upínací částí. Materiálů obou nástrojů byl zvolen 19 830. Průtlačnice bude zalisována v objímce.

Zvolené parametry průtlačníku:

$$d = 15,1 \text{ mm}$$

$$d_1 = 1,3 \cdot d = 1,3 \cdot 15,1 = 19,6 \text{ mm}$$

Volím $\varnothing d_1 = 20 \text{ mm}$

$$d_2 = 1,6 \cdot d = 1,6 \cdot 15,1 = 24,2 \text{ mm}$$

Volím $\varnothing d_2 = 24 \text{ mm}$

$$h \leq 3 \cdot d$$

$$h \leq 3 \cdot 15,1$$

$$h \leq 45,3$$

Volím $h = 30 \text{ mm}$

$$h_1 = 0,5 \cdot d = 0,5 \cdot 15,1 = 7,55 \text{ mm}$$

Volím $h_2 = 8 \text{ mm}$

$$h_2 \geq 0,5 \cdot d$$

$$h_2 \geq 0,5 \cdot 15,1$$

$$h_2 \geq 7,55$$

Volím $h_2 = 8 \text{ mm}$

$$R_1 = 0,3 \cdot (d_2 - d_1) = 0,3 \cdot (24 - 20) = 1,2 \text{ mm}$$

$$R_2 = d = 15,1 \cong 15 \text{ mm}$$

$$\varphi = 15^\circ \div 30^\circ$$

Volím $\varphi = 25^\circ$

Zvolené parametry průtlačnice:

Volím $D_1 = 15,1 \text{ mm}$

$$D_4 = D_3 + (0,1 \div 0,2) = 11 + 0,2 = 11,2 \text{ mm}$$

$$h = 0,5 \cdot \sqrt{D_3} = 0,5 \cdot \sqrt{11} = 1,66 \cong 1,7 \text{ mm}$$

$$2 \cdot \alpha = 30^\circ \div 90^\circ$$

Volím $\alpha = 30^\circ$

$$R_1 = \frac{D_1 - D_3}{2} = \frac{15,1 - 11}{2} = 2,1 \text{ mm}$$

$$R_2 = (0,05 \div 0,1) \cdot D_3 = 0,09 \cdot 11 = 1 \text{ mm}$$

$$R_3 = 0,15 \cdot D_1 = 0,15 \cdot 15,1 = 2,3 \cong 2,5 \text{ mm}$$

$$h_2 \geq 0,7 \cdot D_1$$

$$h_2 \geq 9,8$$

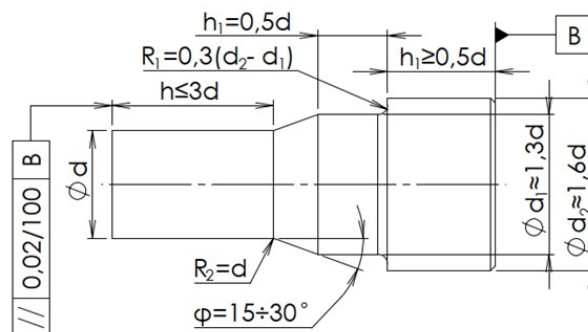
Volím $h_2 = 28 \text{ mm}$

$$\gamma = 1^\circ \div 3^\circ$$

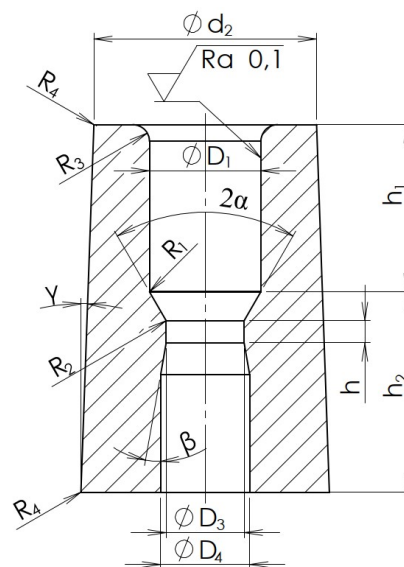
Volím $\gamma = 2^\circ$

$$\beta = 5^\circ \div 10^\circ$$

Volím $\beta = 8^\circ$



Obr. 46 Geometrické parametry průtlačníku



Obr. 47 Geometrické parametry průtlačnice

4 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Pro výrobu šroubu jsou vhodné dvě technologie a to tvářením za studena a obráběním. Obecně platí, že tvářením má vyšší využití materiálu, produktivitu a lepší mechanické vlastnosti výlisku. Oproti tomu obrábění má menší náklady na stroje a nástroje. Součástí této práce nejsou výpočty výrobních časů a z toho důvodu bude srovnání technologie tvářením a obráběním, omezeno pouze na srovnání spotřeby materiálu a jeho ceny.

Hmotnost součásti:

$$M = V_c \cdot \rho \cdot 10^{-9} \text{ [kg]} \quad (4.1)$$

Kde: ρ – hustota oceli [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$], pro ocel 11 320 $\rho = 7850 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

$$M = V_c \cdot \rho \cdot 10^{-9} = 8330 \cdot 7850 \cdot 10^{-9} = 0,065 \text{ kg}$$

Přímé náklady na materiál pro tvářením:

$$PN_M = M \cdot C_M \cdot n \text{ [Kč]} \quad (4.2)$$

Kde: C_M – cena materiálu [Kč/kg], pro ocel 11 320 volím $C_M = 30 \text{ Kč/kg}$
 n – velikost série [ks/rok]

Přímé náklady na materiál při tvářením:

$$PN_{Mt} = M_t \cdot C_M \cdot n = 0,065 \cdot 30 \cdot 200000 = 390\,000 \text{ Kč}$$

Cena materiálu při tvářením jednoho kusu:

$$PN_{Mt1} = M_t \cdot C_M \cdot n_1 = 0,065 \cdot 30 \cdot 1 = 1,95 \text{ Kč}$$

Objem polotovaru při obrábění dle (3.1):

$$V_{vob} = h_{vob} \cdot S_{vob} = h_{vo} \cdot \frac{\pi \cdot D_{vob}^2}{4} = 57 \cdot \frac{\pi \cdot 22^2}{4} = 21\,668 \text{ mm}^3$$

Hmotnost polotovaru pro obrábění:

$$M_{ob} = V_{vob} \cdot \rho \cdot 10^{-9} = 21668 \cdot 7850 \cdot 10^{-9} = 0,17 \text{ kg}$$

Hmotnost vratného odpadu:

$$M_V = M_{ob} - M \text{ [kg]} \quad (4.3)$$

$$M_V = 0,17 - 0,065 = 0,105 \text{ kg}$$

Zisk z vratného odpadu:

$$Z_V = M_V \cdot C_V \cdot n \text{ [Kč]} \quad (4.4)$$

Kde: C_V – výkupní cena materiálu [Kč/kg], volím $C_V = 3,5 \text{ Kč/kg}$

$$Z_V = 0,105 \cdot 3,5 \cdot 200000 = 73\,500 \text{ Kč}$$

Cena za materiál při obrábění:

$$C_{Mob} = M \cdot C_M \cdot n \text{ [Kč]} \quad (4.5)$$

$$C_{Mob} = M_{ob} \cdot C_M \cdot n = 0,17 \cdot 30 \cdot 200000 = 1\,020\,000 \text{ Kč}$$

Přímé náklady na materiál při obrábění:

$$PN_{Mob} = C_{Mob} - Z_V \text{ [Kč]} \quad (4.6)$$

$$PN_{Mob} = 1\,020\,000 - 73\,500 = 946\,500 \text{ Kč}$$

Z výpočtů vyplývá, že náklady na materiál jsou v případě obrábění více než dvojnásobné. Při výrobní sérii 200 000 kusů za rok a ceně oceli 11 320.3 $C_M = 30 \text{ Kč}$, jsou přímé náklady na materiál pro tvářením $PN_{Mt} = 390\,000 \text{ Kč}$ a pro obrábění $PN_{Mob} = 946\,500 \text{ Kč}$.

5 ZÁVĚRY

Cílem bakalářské práce bylo navržení výrobního postupu pojistného šroubu k uchycení kol automobilu, z konstrukční oceli 11 320.3. Byly uvažovány tři možné technologie výroby a to kování, obrábění a tváření za studena. Pro sérii 200 000 kusů za rok se jako nejvhodnější jevila technologie tváření za studena. Následně se provedla literární studie zvolené technologie, v rámci které byly popsány některé metody a vysvětleny základní pojmy.

Další část práce se zabývala samotným návrhem výroby. Nejdříve byl zvolen průměr polotovaru 15 mm, byla upřednostněna varianta, která předpokládala rovnoměrné logaritmické přetvoření dráku a největšího průměru hlavy. Pro řešený polotovar se navrhly dvě výrobní varianty, pro které bylo vypočítáno logaritmické přetvoření v jednotlivých částech šroubu. Na základě výpočtů byla zvolena varianta technologického postupu výroby šroubu, kdy byl polotovar - drát ustřižen, polotovar byl předpěchování, dopředného protlačování dráku, pěchování hlavy společně se zpětným protlačováním otvoru, kalibrací hlavy a na závěr tvářením závitu.

Bylo nutné provést výpočet rozměrů součásti v jednotlivých operacích potřebné pro další výpočty a návrh tvářecího nástroje. Za tímto účelem bylo využito zákona o zachování objemu. Podle výsledné tvářecí síly 1 313 kN a práce 7 490 J byl pro výrobu šroubu zvolen tvářecí automat TPZK 25 od firmy ŠMERAL. Na základě geometrie součásti byla navržena sestava nástroje pro její zhotovení skládající se z průtlačníku a průtlačnice.

Součástí práce je ekonomické zhodnocení, které bylo omezeno na výpočet ceny materiálu a srovnání technologie tváření s obráběním, ze kterého je zřejmé, že při obrábění dosahují náklady na materiál až dvojnásobku ceny oproti technologii tváření. Přímé náklady na materiál pro tváření jsou 390 000 Kč.

Na práci je možné dále pracovat a rozšířit ji za rámec bakalářské práce například o podrobnější popis vnitřních procesů během tváření a komplexnější srovnání technologií.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [26]

1. FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 225 s. ISBN 80-214-2374-9.
2. BABOR, Karel, Augustin CVILINEK, Jan FIALA a Vladimír HAŠEK. *Objemové tváření oceli*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1967, 329 s.
3. FELDMAN, Heinz D. *Protlačování oceli*. Praha: SNTL, 1962, 196 s.
4. ČADA, Radek. *Postup údržby I* [online]. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2007 [cit. 2019-05-19]. ISBN 978-80-248-1506-0. Dostupné z: <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/PU1/Postupy-udrzby-I.pdf>
5. LENFELD, Petr. *Technologie tváření kovů*. Technická univerzita Liberec, Fakulta strojní. Dostupný z WWW: <http://www.ksp.tul.cz>
6. Cold forming: *byora* [online]. [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <https://www.byora.co.jp/index/en/index/cold-forming/index.html>
7. FABÍK, Richard. *Tváření kovů: učební text : studijní materiály pro studijní program Metalurgické inženýrství Fakulty metalurgie a materiálového inženýrství*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2012. ISBN 978-80-248-2572-4.
8. Metal forming process [online]. [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: http://www.iitg.ac.in/engfac/ganu/public_html/Metal%20forming%20processes_full.pdf
9. Metal forming: *thelibraryofmanufacturing* [online]. [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: https://thelibraryofmanufacturing.com/forming_basics.html
10. PLACHÝ, Jan, Jiří PROCHÁZKA a Jan PRUDKÝ. *Technologie slévání, tváření a svařování*. Praha: ČVUT Praha, 1970, 158 s.
11. SCHINDLER, Ivo a Petr KAWULOK. *Deformační chování materiálů* [online]. Ostrava, 2013 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: https://www.fmfi.vsb.cz/export/sites/fmfi/modin/cs/studijni-opory/resitelsky-tym-2-metalurgie/deformacni-chovani-materialu/Schindler_Kawulok_Deformacni_chovani_materialu.pdf
12. *Cold forging* [online]. In: . 2015 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <https://www.shuo-hong.com/albums/cold-forging/>
13. ČECHURA, Milan, Jan HLAVÁČ a Jiří STANĚK. *Konstrukce tvářecích strojů* [online]. Plzeň: ZČU, 2014 [cit. 2019-05-19]. ISBN 978-80-261-0513-8. Dostupné z: <https://old.zcu.cz/export/sites/zcu/pracoviste/vyd/online/Konstrukce-tvarecich-stroju.pdf>
14. *TURNING PROCESS: sundary* [online]. [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <https://www.sundary.com/what-is-cnc-turning-process/>
15. *OPEN DIE FORGING: dropforging* [online]. [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <http://www.dropforging.net/open-die-forging.html>

16. FOREJT, Milan. Mechanické vlastnosti vybraných ocelí za vyšších rychlostí deformace: *Databáze materiálových modelů k predikci chování materiálů v tvářecím procesu* [online]. [s.l.], 2004. 5 s. Grant ČR. VUT, FSI, Ústav strojírenské technologie, odbor tváření. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/img/databaze/ocel_113205r.pdf
17. ČSN 11320 – ocel k tažení a tváření za studena: *czferrosteel* [online]. [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <http://www.czferrosteel.cz/pdf/trubky1-11320.pdf>
18. Šrouby na originální kola: *alukola-obchod* [online]. [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: https://www.alukola-obchod.cz/srouby-na-originalni-kola-audi-seat-skoda-vw-m14x1-5x27mm-koule-klic-17.html?gclid=Cj0KCQjwnpXmBRDUARIsAEo71tSBfN1zf_gDYnVMq_C8vUqz83Ozcae-VtV74W3nc3a9qUuNGsneNTYsAtsJEALw_wcB
19. Kola dělají auto [online]. 2010 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <https://www.ceskatelevize.cz/porady/1170433294-auto-moto-revue/3869-radime/?clanek=982>
20. Kolové šrouby a matice: *autokseft* [online]. 2002 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <https://www.autokseft.cz/Srouby-matice>
21. První automobil vznikl před 120 lety: *auto* [online]. 2006 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <https://www.auto.cz/prvni-automobil-vznikl-pred-120-lety-14781>
22. NOVOTNÝ, Karel. *Tvářecí nástroje*. Brno: Vysoké učení technické, 1992. ISBN 80-214-0401-9.
23. Katalog obráběcích a tvářecích strojů. *Ústav strojírenské technologie* [online]. [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/vyuka/katalog/kat/view1_1.html
24. KLIKOVÉ LISY. In: *Smeral.cz* [online]. [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: http://www.smeral.cz/klikove_lisy.html
25. Machines and accessories. In: *Https://hatebur.com* [online]. [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <https://hatebur.com/en/machines-accessories/machines/hatebur-1/coldmatic-1/cm-625/>
26. CITACE PRO: *Generátor citací* [online]. 2013 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <http://citace.lib.vutbr.cz/info>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
a_s	délka strany šestihranu	[mm]
A	tažnost	[%]
C_v	výkupní cena materiálu	[Kč]
C_M	cena materiálu	[Kč/kg]
C_{Mob}	cena za materiál při obrábění	[Kč/kg]
d_v	vnitřní průměr výtažku	[mm]
d_{vn}	vnější průměr výtažku	[mm]
D_k	konečný vnější průměr	[mm]
D_{ku}	průměr kužele	[mm]
D_p	počáteční vnější průměr	[mm]
D_v	průměr válce	[mm]
f	součinitel tření	[-]
f_1	součinitel smykového tření zásobníku	[-]
f_2	součinitel smykového tření průtlachnice	[-]
f_3	součinitel smykového tření kalibračního oka	[-]
F	tvářecí síla	[N]
h_k	konečná výška	[mm]
h_k	výška kužele	[mm]
h_{kk}	výška kuželu	[mm]
h_p	počáteční výška	[mm]
h_s	výška šestihranu	[mm]
h_v	výška válce	[mm]
l_k	výška kalibračního oka	[mm]
l_p	výška neprotlačeného tělesa	[mm]
M	hmotnost	[kg]
M_v	hmotnost vratného odpadu	[kg]
n	velikost série	[ks]
PN_M	přímé náklady na materiál pro tváření	[Kč]
PN_{Mob}	přímé náklady na materiál pro obrábění	[Kč]
r_{kk1}	poloměr dolní podstavy	[mm]
r_{kk2}	poloměr horní podstavy	[mm]
R_e	mez kluzu	[MPa]
R_m	mez pevnosti	[MPa]
s	tloušťka stěny	[mm]
S	Obsah přechované plochy	[mm ²]
S_s	obsah šestihranu	[mm ²]
S_v	obsah kruhu	[mm ²]
T	teplota	[°C]
T_{tav}	teplota tavení	[°C]
Z	kontrakce	[%]
Z_v	zisk z vratného odpadu	[Kč]

α	úhel kuželu průtlačnice	[°]
β	úhel	[°]
γ	úhel	[°]
ρ	hustota	[kg · m ⁻³]
σ_d	deformační odpor	[MPa]
σ_{p1}	přetvárný odpor materiálu v předchozí operaci	[MPa]
σ_{ps}	přirozený přetvárný odpor	[MPa]
ε	Poměrné přetvoření	[-]
Δh	rozdíl počáteční a konečné výšky	[m]
φ	logaritmického přetvoření	[-]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Kolo automobilu [19].....	9
Obr. 2 Rozdělení šroubů k upevnění k automobilu [20].....	9
Obr. 3 Šroub na kola automobilu [18]	10
Obr. 4 Kování [15]	11
Obr. 5 Obrábění [14]	11
Obr. 6 Součásti vyráběné objemovým tvářením	12
Obr. 7 Rozdělení tvářecích procesů podle teploty [5].....	13
Obr. 8 Závislost mechanických vlastností na stupni deformace	13
Obr. 9 Schéma pěchování	14
Obr. 10 Schéma dopředného protlačování	14
Obr. 11 Schéma zpětného protlačování	15
Obr. 12 Schéma protlačování	15
Obr. 13 Součásti kalíškového tvaru [2].....	16
Obr. 14 Součásti čepového tvaru [2].....	16
Obr. 15 Nízké rotační součásti s průchozím otvorem [2]	16
Obr. 16 Součásti nepravidelného tvaru [2]	16
Obr. 17 Příklady vhodného a nevhodného tvaru výlisků.....	17
Obr. 18 Klikový lis [24]	20
Obr. 19 Postupový automat [25]	20
Obr. 20 Schéma nástroje pro dvoufázový pěchovací automat.....	21
Obr. 21 Používané tvary pěchovníků [2]	21
Obr. 22 Konstrukční provedení pěchovníků [1]	21
Obr. 23 Provedení průtlačníku [1]	22
Obr. 24 Doporučené rozměry pro průtlačník [1]	22
Obr. 25 Průtlačnice pro dopředné protlačování [1].....	22
Obr. 26 Objem V_{s1}	23
Obr. 27 Objem V_{v2}	24
Obr. 28 Objem V_{kk3}	24
Obr. 29 Objem V_{v4}	24
Obr. 30 Objem V_{kk5}	24
Obr. 31 Objem V_{v6}	24
Obr. 32 Objem V_{k7}	24
Obr. 33 Diagram logaritmického přetvoření pro variantu 1	26
Obr. 34 Diagram logaritmického přetvoření pro variantu 2	27
Obr. 35 Tvářecí postup pro variantu A	27
Obr. 36 Tvářecí postup pro variantu B	28
Obr. 37 Rozměry po operaci stříh	28
Obr. 38 Rozměry po 1. operaci	29
Obr. 39 Rozměry po 2. operaci	29
Obr. 40 Rozměry po 3. operaci	30
Obr. 41 Rozměry dílu po 1. operaci.....	31
Obr. 42 Rozměry dílu po 2. operaci.....	31
Obr. 43 Rozměry dílu po 4. operaci.....	32
Obr. 44 Rozměry dílu po 4. operaci.....	34
Obr. 45 Postupový automat TPZK 25 [23]	36
Obr. 46 Geometrické parametry průtlačníku	37
Obr. 47 Geometrické parametry průtlačníku	37

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Chemické složení oceli	10
Tab. 2 Vybrané mechanické vlastnosti oceli	10
Tab. 3 Doporučené parametry průtlačnice	22
Tab. 4 Základní parametry tvářecího automatu	36

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Křivky přetvárných odporů pro ocel 11 320 5R

SEZNAM VÝKRESŮ

Šroub na kola	BP-01
Průtlačník	BP-02
Průtlačnice	BP-03
Nástroj	BP-04

Příloha 1 Křivky přetvárných odporů pro ocel 11 320 5R

Materiál 11 320 5R		označení A		Teplota 23°C		
Aprox. křivka	Rovnice ^{m)}		I _{yx}	σ ²	σ ²	
Polytropa	σ _f = 383,23 φ ^{0,4939} + 235,06 [MPa]		0,97851	1217,802	2927,242	
Polynom 3. stupně	σ _f = 277,15 φ ³ - 734,94 φ ² + 751,35 φ + 283,82 [MPa]		0,99578	247,329	5698,556	
Polynom 5. stupně	σ _f = 501,72 φ ⁵ - 2209,83 φ ⁴ + 3709,53 φ ³ - 2943,11 φ ² + 1266,96 φ + 261,04 [MPa]		0,99827	111,115	2333,416	
Racionálně lomená funkce	F = 379,66 φ ⁵ - 1424,93 φ ⁴ + 2041,96 φ ³ - 1183,34 φ ² + 432,30 φ + 50,06 [kN]		0,99989	23,750	458,754	
	D = 1,78 φ ⁵ - 8,20 φ ⁴ + 14,02 φ ³ - 5,66 φ ² + 7,02 φ + 16,25 [mm]		0,99990	0,003	0,068	
σ _f = $\frac{F}{D^2} \frac{4000}{\pi}$ [MPa]						
a = 0,07 φ ⁴ - 0,24 φ ³ + 0,38 φ ² + 0,28 φ [Jmm ⁻³]			φ _{str.} = 0,0153 [s ⁻¹]			

m) Pozn.: Rovnice platí pro φ v intervalu 0 až 1,75

Materiál 11 320 SR		označení B		Teplota 23°C		
Aprox. křivka		Rovnice m)		I_{yx}	σ^2	δ^2
Polytropa		$\sigma_f = 366,24 \varphi^{0,2586} + 337,41$ [MPa]		0,97573	334,004	9686,112
Polynom 3. stupně		$\sigma_f = 403,46 \varphi^3 - 1015,34 \varphi^2 + 856,14 \varphi + 433,01$ [MPa]		0,97519	473,435	13256,166
Polynom 5. stupně		$\sigma_f = 723,97 \varphi^5 - 2987,60 \varphi^4 + 4777,18 \varphi^3 - 3691,19 \varphi^2 + 1458,65 \varphi + 407,89$ [MPa]		0,98312	348,216	9053,625
Racionálně lomená funkce		$F = 368,15 \varphi^5 - 1325,07 \varphi^4 + 1893,96 \varphi^3 - 1140,02 \varphi^2 + 460,21 \varphi + 82,66$ [kN]		0,99970	18,979	493,465
	$\sigma_f = \frac{F}{\rho^2} \frac{4000}{\pi}$ [MPa]	$D = 2,27 \varphi^5 - 10,73 \varphi^4 + 18,50 \varphi^3 - 8,69 \varphi^2 + 7,49 \varphi + 16,25$ [mm]		0,99996	0,002	0,059

$a = 0,10 \varphi^4 - 0,34 \varphi^3 + 0,43 \varphi^2 + 0,43 \varphi$ [Jmm ⁻³]	$\dot{\varphi}_{stat} = 6,1885$ [s ⁻¹]
--	--

m) Pozn.: Rovnice platí pro φ v intervalu 0 až 1,55

Materiál 11 320 5R

